

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta Stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Vliv transformace inženýrskogeologického modelu do výpočetního
geotechnického modelu na výsledky simulací stability svahu

Effect of Transformation of Engineering Geological Model into
Calculation Geotechnical Model on Slope Stability Simulation Results

Student:

Bc. Jan Požár

Vedoucí diplomové práce:

doc. RNDr. Pavel Pospíšil, Ph.D.

Konzultant:

Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Požár**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T035 Geotechnika

Téma: Vliv transformace inženýrskogeologického modelu do výpočetního geotechnického modelu na výsledky simulací stability svahů
Effect of Transformation of Engineering Geological Model into Calculation Geotechnical Model on Slope Stability Simulation Results

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Inženýrskogeologické poměry zájmové oblasti.
- 2) Poloskalní horniny (weak rocks), jejich původ, vlastnosti a chování.
- 3) Smyková pevnost poloskalních hornin a jejich eluvia a rizika při jejím stanovení. Okrajové podmínky použití výsledků smykových zkoušek.
- 4) Příprava inženýrskogeologického a výpočetního geotechnického modelu.
- 5) Vliv transformace inženýrskogeologického modelu do výpočetního geotechnického modelu na výsledky simulací.
- 6) Zhodnocení stability poloskalních hornin a jejich eluvií v zájmové oblasti.
- 7) Závěry a doporučení

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Baroň I, Klimeš J. *Sesuvy, člověk a krajina* : sborník referátů a prezentací z odborného semináře konaného ve dnech 16-18. dubna 2003 v rekreačním středisku Myacentrum v Hutisku-Solanci. Brno: Česká geologická služba; 2003.
- [2] Evans SG, DeGraff JV. *Catastrophic landslides : effects, occurrence, and mechanisms*. Boulder: <<The >>Geol. Soc. of America; 2002.
- [3] Faktorová K, Knížek M. *Vliv geodynamických jevů na liniové inženýrské stavby* [Bakalářská práce (Bc)]: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, 2015.
- [4] Genuchten PMBV. *Movement mechanisms and slide velocity variations of landslides in varved clays in the French Alps = Bewegingsmechanismen en glijnsnelheidsvariates van aardverschuivingen in warvenklei in de Franse Alpen*. Amsterdam Utrecht: Koninklijk Nederlandse Aardrijkskundig Genootschap ; Geografisch Instituut Rijksuniversiteit Utrecht; 1989.
- [5] Mencl V, Záruba Q. *Landslides and their control*. Prague: Academia; 1969.
- [6] Nilsen TH, Turner BL. *Influence of Rainfall and Ancient Landslide Deposits on Recent Landslides (1950-71) in Urban Areas of Contra Costa County, California*. Washington: U.S. Govt. Print. Office; 1975.
- [7] Rybář J, Stemberk J, Wagner P. *Landslides : proceedings of the First European Conference on Landslides* : Prague, Czech Republic, June 24-26, 2002. Lisse: A.A. Balkema; 2002.
- [8] Sassa K. *Progress in landslide science*. Berlin: Springer; 2007.
- [9] Singh B, Goel RK, ebrary Inc. *Engineering rock mass classification tunnelling, foundations, and landslides*. Burlington, Mass.: Butterworth-Heinemann; 2011.
- [10] Wagner P, Novosad S. *Landslides : seventh international conference and field workshop*. Rotterdam:

Balkema; 1993.

[11] Záruba Q, Mencl V. *Sesuvy a zabezpečování svahů*. Vyd. 1. ed. Praha: Academia; 1969.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Pavel Pospíšil, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2017

Datum odevzdání: 30.11.2017



doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Rádím Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace:

Diplomová práce se zabývá využitelností inženýrsko-geologického modelu pro geotechnické výpočty na příkladu zájmové oblasti, kde došlo k velkému sesuvu. V práci je popsána základní geologická stavba oblasti a její vývoj. S těmito poznatky a dalšími dostupnými nebo poskytnutými informacemi byl vytvořen geologický model zájmové oblasti. Tento model byl následně vhodným způsobem upraven do formy, která je přijatelná pro geotechnické modelování. Zájmová oblast reprezentovaná tímto geotechnickým modelem byla posouzena na stabilitu a dosažené výsledky byly zhodnoceny z hlediska událostí, ke kterým v zájmové oblasti došlo. Výsledky byly porovnány se závěry dosaženými jinými metodami modelování, které nejsou součástí této práce.

Klíčová slova: inženýrsko-geologický model, geotechnický model, geologická stavba, poloskalní horniny, transformace mezi typy modelů, stabilita svahu

Abstract:

This graduation thesis is focused on usability of an engineering geological model for geotechnical calculations on the area of interest, where huge landslide happened in the past. The thesis includes a description of local rock massif structure of the area of interest and its development. With this knowledge and the other available provided information was created geological model of the landslide area. Afterwards, this model was edited in suitable way into form, which is appropriate for geotechnical calculations. The area of interest which is represented by this geotechnical model was assessed on stability. Achieved results were judged by considering the events, that happened in the area of interest, Subsequently, these achieved results were compared with outcomes of different methods, which are not part of this thesis.

Keywords: engineering geological model, geotechnical model, geological structure, weak rocks, transformation between different types of models, slope stability

Obsah

Seznam použitého značení	4
1. Úvod.....	5
2. Metodika Práce.....	8
2.1 Popis zájmové oblasti	8
2.2 Metodika tvorby geologického modelu	10
2.2.1 Vstupní data.....	10
2.2.2 Převod vstupních dat do RockWorks 17	12
2.2.3 Možnosti modelování	13
2.3 Metodika transformace IG modelu do geotechnického výpočetního modelu	20
2.4 Metodika posouzení stability zájmové oblasti.....	21
2.4.1 Vstupní data.....	21
2.4.2 Síť (Mesh)	22
2.4.3 Parametry podzemní vody (Flow Conditions)	23
2.4.4 Způsob výpočtu (Staged Construction).....	24
3. Charakteristika poloskalních hornin.....	26
4. Smyková pevnost poloskalních hornin	30
5. Geomorfologické členění a zařazení	33
6. Geologická stavba zájmové oblasti	35
6.1 Hlubinný základ zájmové oblasti	36
6.2 Křídové formace	36

6.3	Terciární formace	38
6.4	Kvartérní formace.....	41
7.	Tvorba inženýrskogeologického modelu	43
8.	Vliv transformace inženýrskogeologického modelu do geotechnického výpočetního modelu a jeho vytváření	54
9.	Zhodnocení stability zájmové oblasti.....	57
9.1	Vyhodnocení napěťo-deformačního stavu	57
9.2	Vyhodnocení plastických oblastí.....	60
9.3	Vyhodnocení pórových tlaků.....	61
9.4	Stabilitní posouzení	62
10.	Závěr.....	64
11.	Zdroje	65
12.	Seznam příloh.....	67

Seznam použitého značení

- Depth to top – hloubka vrchu litologické formace ve vrtu
- Depth to base – hloubka spodku litologické formace ve vrtu
- E (kPa) – modul pružnosti
- JRC (-) – koeficient drsnosti povrchu
- M_{sf} (-) – stupeň bezpečnosti
- P_{excess} (kPa) – pórový tlak
- R (MPa) – pevnost v jednoosém tlaku
- SoilID – identifikátor litologické formace
- X (m) – vodorovná souřadnice v systému S-JTSK
- Y (m) – svislá souřadnice v systému S-SJTSK
- Z (m) – nadmořská výška v systému Bpv
- c (kPa) – soudržnost
- u_{tot} (m) – deformace
- γ_s (kPa) – totální smykové napětí
- γ_{sat} (kN*m⁻³) – objemová hmotnost saturované horniny
- γ_{unsat} (kN*m⁻³) – objemová hmotnost nesaturované horniny
- ν (-) – Poissonův součinitel
- σ'_{xx} (kPa) – totální vodorovné napětí
- σ'_{yy} (kPa) – totální svislé napětí
- ϕ (°) – úhel vnitřního tření

1. Úvod

Dne 7. června 2013 došlo na 56,5. kilometru dálnice D8 Praha – Drážďany k masivnímu sesuvu asi 500 tisíc metrů krychlových půdy u obce Dobkovičky v chráněné krajinné oblasti České středohoří. Jednalo se o poslední nedostavěný úsek dálnice D8 označený jako 0805 mezi obcemi Lovosice a Řehlovice. Otevření tohoto úseku se v důsledku sesuvu odložilo o další téměř 3 roky z tehdy plánovaného termínu - začátku roku 2014 až na prosinec roku 2016. (Wikipedia ©, 2017)



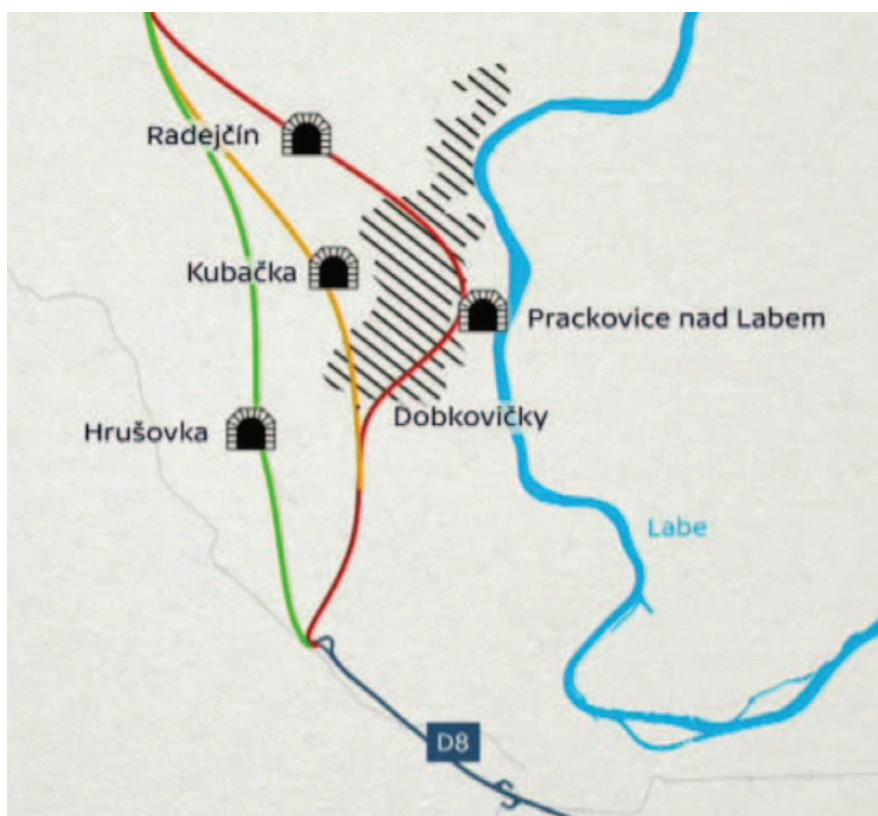
Obrázek 1. Sesuv na dálnici D8 u Dobkoviček v roce 2013 (© Česká televize 1996 – 2017)
Pohled od severu

Bylo dlouho známo, že oblast, kterou byla v tomto úseku dálnice D8 nakonec vedena, je z geologického hlediska velmi nestabilní a pro stavbu dálnice nevhodná. Podle světového experta na sesuvy půdy Rolfa Katzenbacha se jedná o tzv. „creeping area“ – sunoucí se oblast (Centrum.cz | Atlas.cz 1999 – 2017 © Economia, a.s.). Orgány zodpovědné za tuto stavbu byly s touto skutečností seznámeny už nejméně v roce 1995, kdy probíhala prvotní projekční a průzkumná činnost týkající se výstavby dálnice D8 přes České středohoří. Už v roce 1973 však byla zpracována mapa této oblasti upozorňující na hrozící svahové pohyby. Mapa je přiložena v příloze 3.

Při projektování tohoto úseku D8 byly navrženy tyto varianty:

- Objízdna trasa celého Českého středohoří,
- dlouhý tunel Hrušovka – návrh zahrnoval asi 13 km dlouhý tunel, kterým by byl veden celý úsek 0805,
- tunel Kubačka – tato varianta počítala s 3,5 km dlouhým tunelem pod vrchem Kubačka,
- přímé vedení trasy z větší části na povrchu.

(© Česká televize 1996 - 2017)



Obrázek 2. Varianty vedení dálnice D8 v úseku 0805 (© Česká televize 1996 – 2017)

Zelená - dlouhý tunel

Žlutá - Tunel Kubačka

Červená - přímé vedení trasy

Šrafování - oblast ohrožená sesuvy

Zde je nutné uvést, že výše zmíněné varianty vycházejí z tehdejšího doporučení České geologické služby (ČGS) a pro ty zavržené nebyl proveden ani základní geologický průzkum. Jejich proveditelnost je tedy neznámá (© Česká televize 1996 – 2017).

Nakonec byla zvolena poslední, nejrizikovější varianta - vést dálnici Labským údolím přes nestabilní území (viz obrázek 2). Za tímto rozhodnutím stál pravděpodobně politický a ekonomický lobbying a také předpokládaná vysoká cena podzemního vedení dálnice. Na problematičnost a rizika tohoto trasování dálnice D8 už od samého počátku upozorňovali geologové ČGS v čele s RNDr. Vladimírem Cajzem, CSc., expertem pro geologické poměry Českého středohoří, nebo ekologická společnost Děti Země (© Vydavatelství Referendum s.r.o. 2017).

Mezi nejdiskutovanější příčiny sesuvu patří:

- Nepříznivý vliv podzemní vody, která byla po deštích v době, kdy došlo k sesuvu, na abnormálně vysoké úrovni,
- přetížení svahu činností lomu na vrchu Kubačka nad oblastí sesuvu,
- jakékoli chybné zajištění svahu odřezu dálnice D8, který byl v této části proveden,
- přirozená nestabilita svahu v údolí Labe, jak bylo popsáno výše.

Diplomová práce se však nezabývá posuzováním, proč k sesuvu na D8 došlo. Poté co se tak stalo, byl proběhnuvší sesuv velmi podrobně prozkoumán a zdokumentován. V rámci projektů na katedře geotechniky FAST VŠB-TUO byla tato data upravena do podoby, jak pravděpodobně vypadala geologická situace v dané oblasti po vybudování odřezu a před aktivací sesuvu. Úkolem této práce je pomocí těchto dat vytvořit geologický model oblasti sesuvu, následně jej upravit do formy vhodné pro geotechnické modelování a posoudit, jak jsou jejich výsledky relevantní, a celkově jak je tento způsob řešení daného problému vhodný.

2. Metodika Práce

2.1 Popis zájmové oblasti

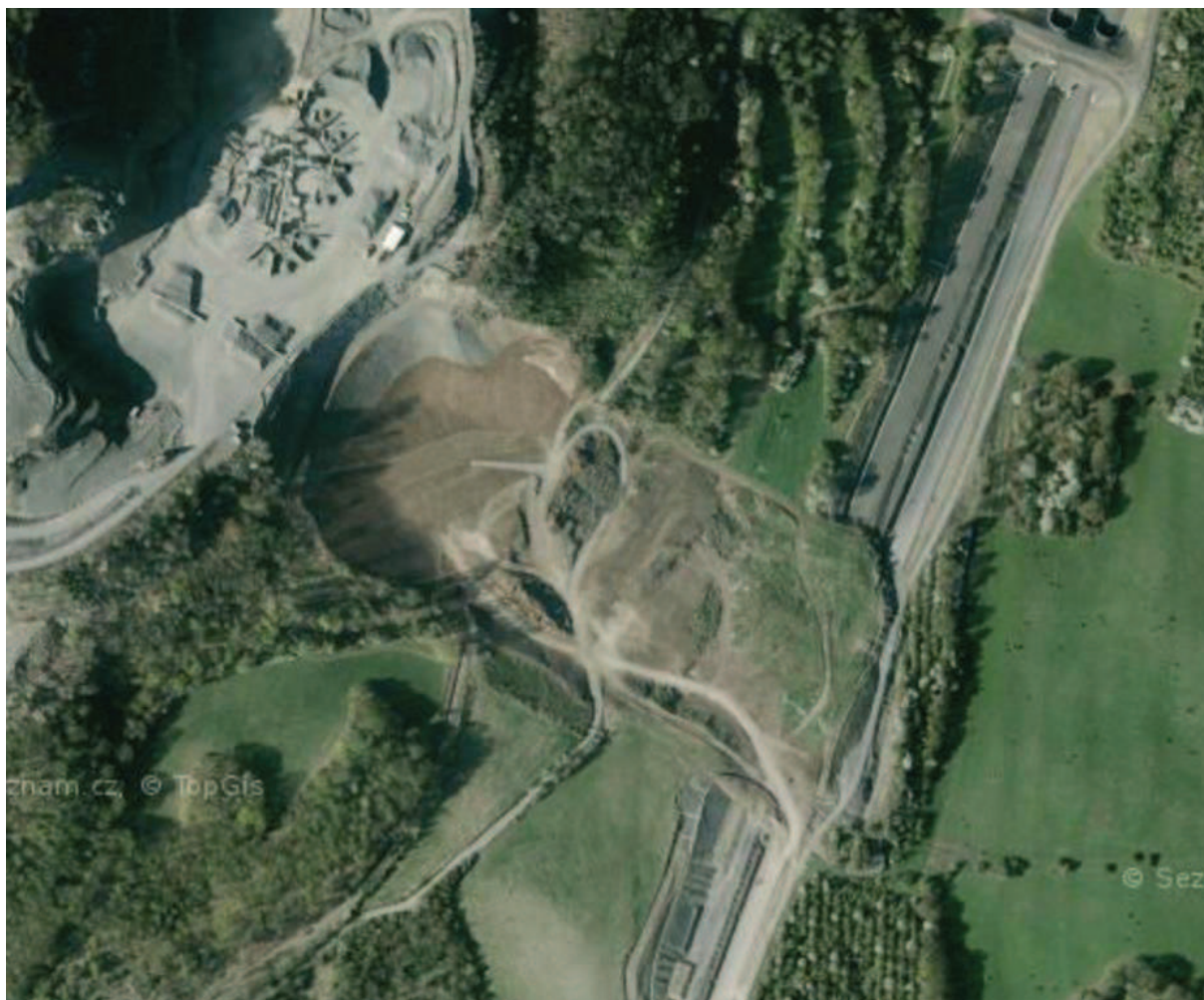
Oblast sesuvu se nachází zhruba 8,5 km severozápadně od obce Litoměřice v Ústeckém kraji. Jedná se o oblast ležící v katastrálním území obce Dobkovičky (653331¹) a Litochovice nad Labem (685411¹). Oblast se nachází zhruba mezi obcemi Dobkovičky (vzdálenost cca 900 m), Prackovice nad Labem (vzdálenost cca 1300 m), Litochovice nad Labem (vzdálenost cca 1450 m) a vrcholem Kubačka (vzdálenost cca 900 m).



Obrázek 3. Vymezení zájmové oblasti (Mapy.cz ©, 2017)

¹ Číslo katastrálního území

Sesuv proběhl na svazích nepojmenovaného vrchu o nadmořské výšce 522 m n. m. asi 630 m jihovýchodně od jeho vrcholu. Severozápadní hranici sesuvu tvoří kamenolom rozkládající se na svazích výše zmíněného nepojmenovaného vrchu a vrchu Kubačka o nadmořské výšce 543 m n. m. Jihovýchodní hranici sesuvu tvoří zhruba dálnice D8. Z jihozápadní a severovýchodní strany není na povrchu oblast sesuvu ohraničena žádnými výraznými přírodními ani antropogenními prvky. Sesuv je zachycen na obrázku 4 (Snímek z roku 2015).



Obrázek 4. Oblast sesuvu v roce 2015 (Mapy.cz ©, 2017)

Zájmová oblast je nejprve zařazena z geomorfologického hlediska a následně je popsána její geologická stavba od podloží do nadloží. Jsou také popsány základní charakteristiky poloskalních hornin, které se v oblasti vyskytují.

2.2 Metodika tvorby geologického modelu

Pro tvorbu geologického modelu bude využit software RockWorks 17 společnosti RockWare. Tento software je hojně využíván v těžařském, hornickém a geologickém inženýrství, stejně tak jako při řešení různých enviromentálních problémů. Mezi jeho nejvyužívanější možnosti patří tvorba map, tvorba profilů vrtů, vytváření řezů, křížových a nespojitých diagramů, 3D modelů nebo možnost výpočtu kubatur. RockWorks umožňuje práci s litologickými a stratigrafickými daty, daty o porušenosti dotčených hornin, nebo hydrogeologickými daty (2004-2017 RockWare, Inc. ©, 2017).

Úkolem geologického modelování v programu RockWorks je vytvořit co nejpřesnější litologický model zájmové oblasti s využitím pokročilých možností modelování. Díky sesuvu na dálnici D8 poblíž obce Dobkovičky se zájmové území stalo jednou z nejvíce geologicky prozkoumaných oblastí v rámci České republiky.

2.2.1 Vstupní data

Pro účely modelování v programu RockWorks byly poskytnuty údaje o celkem 42 reálně provedených vrtech. V rámci modelování zájmové oblasti bylo katedrou geotechniky vytvořeno dalších 65 pomocných vrtů, které jsou do modelování taktéž zahrnuty.

Formát dat o jednotlivých vrtech byl do softwaru vkládán v následujícím formátu:

Name	depth to top	depth to base	SoilID
V-6_SGP	0	0.5	6H
V-6_SGP	0.5	9.6	5
V-6_SGP	9.6	10.6	2
V-6_SGP	10.6	11	1

Tabulka 1. upravený formát litologických dat

Name	X	Y	Z
V-6_SGP	-764122.6	-986646.5	310.6

Tabulka 2. upravený formát polohy vrtu

Význam značení – viz str. 4.

Číslům označených jako SoilID přísluší následující litologické formace:

- 1 – slínovec,
- 2 – zvětralý slínovec,
- 3 – tuf (jíl),
- 4 – bazalt,
- 5 – hrubozrnné deluvium,
- 6D – jemnozrnné deluvium – spodní,
- 6H – jemnozrnné deluvium – svrchní.

Přestože vrstvy označené 6D a 6H jsou z litologického hlediska přibližně shodné, pro účely modelování byly nadefinovány zvlášť, aby bylo zabráněno nechtěnému spojení těchto vrstev a následným chybám v modelování.

I když pro pozdější modelování nejsou zcela klíčová, byla zpracována také stratigrafická data o jednotlivých litologických vrstvách. Pro snadnější orientaci byly stratigrafické vrstvy označeny čísly 11-13. Stratigrafické rozdělení je:

- 11 - Křída:
 - 1 – Slínovec
 - 2 – Zvětralý slínovec
- 12 - Neogén:
 - 3 – tuf (jíl)
 - 4 – Bazalt
- 13 - Kvartér:
 - 5 – Hrubozrnné deluvium
 - 6D/6H - Jemnozrnné deluvium

V tabulkové formě jsou data upravena obdobným způsobem jako u litologie.

Name	depth to top	depth to base	SoilID
V-6_SGP	0	9.6	13
V-6_SGP	9.6	11	11

Tabulka 3. upravený formát stratigrafických dat

Vzhledem k tomu, že se v RockWorks pracuje se souřadnicemi lokálních souřadnicových systémů S-JTSK a Bpv, není třeba zadávat v jaké zóně UTM se zájmová oblast nachází.

2.2.2 Převod vstupních dat do RockWorks 17

Pro import všech potřebných dat do RockWorks 17 bylo nutné všechna data vložit do jediného souboru softwaru Microsoft Excel. Ten byl rozdělen na tři záložky:

- Location – informace o poloze a nadmořské výšce vrtu,
- Lithology – litologická stavba vrtů,
- Stratigraphy – stratigrafické rozdělení vrtu.

Všechny vrtu byly upraveny do požadovaného formátu (viz kapitola 2.2.1).








Vzhledem k velkému množství vkládaných dat a jejich komplexnosti nebyla data napřed vkládána do aplikace „Utilities“ (tabulkový procesor softwaru RockWorks), ale rovnou do aplikace „Borehole Manager“. Byla zvolena možnost „import multiple excel table“ a jednotlivým záložkám byl přiřazen odpovídající význam.

Po úspěšném importu do aplikace „Borehole Manager“ jsou všem vrtům přiřazena následující data:

- Borehole name – název vrtu,
- Northing, Easting – souřadnice vrtu,
- Elevation – nadmořská výška vrtu,
- Collar elevation – nadmořská výška vrchu výpažnice vrtu (shodná s elevation),
- Total Depth – celková hloubka vrtu (protažená k nadmořské výšce 240 m. n. m.),
- litologická data,
- stratigrafická data.

Po importu jsou v aplikaci Borehole Manager nadefinovány všechny litologické i stratigrafické formace ve formátu depth to top/depth to base.




Jednotlivým litologickým vrstvám jsou přiřazeny následující barvy a šrafy (zvoleno s ohledem na geologické zvyklosti a už vytvořené modely zájmové oblasti):

G-Value	Keyword	Pattern
4,0	Bazalt	
2,0	Hrubozrnné deluvium	
3,0	Jemnozrnné deluvium - Spodní	
1,0	Jemnozrnné deluvium - Svrchní	
7,0	Slínovec	
5,0	Tuf	
6,0	Zvětralý slínovec	

Obrázek 5. značení litologických vrstev (RockWorks)

Hodnota G-value softwaru RockWorks říká (pokud je v možnostech modelování tak zvoleno), v jakém pořadí má jednotlivé vrstvy modelovat.

Jednotlivým stratigrafickým vrstvám byly přiřazeny následující barvy (zvoleno s ohledem na geologické zvyklosti):

Order	Formation	Pattern
1,0	Kvartér	
2,0	Neogén	
3,0	Křída	

Obrázek 6. Značení stratigrafických vrstev (RockWorks)

2.2.3 Možnosti modelování

Vzhledem ke geologické složitosti zájmové oblasti (sklonitost a reliéf terénu, množství geologických vrstev) pro modelování bylo zřejmé, že výchozí nastavení litologického modelování nebude dostačující a že k dosažení požadovaných výsledků bude nutno využít pokročilejších nástrojů, které software nabízí. Software RockWorks 17 nabízí 4 základní přístupy k vytváření litologického modelu:

1. Metoda nejbližších bodů (Closest point modeling)
2. Metoda postranního náhodného modelování (Lateral blending)

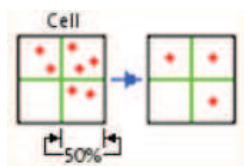
3. Metoda postranního protahování (Lateral extrusion)
4. Metoda nejvyšší pravděpodobnosti (Highest probability)

(2004-2017 RockWare, Inc. ©, 2017)

První tři uvedené metody se hodí spíše pro méně složité geologické podmínky. Vzhledem ke složitosti modelované oblasti byla pro litologické modelování vybrána **metoda nejvyšší pravděpodobnosti**. Tento způsob modelování začíná procesem vytváření tabulky všech unikátních hodnot odpovídajících jednotlivým litologickým jednotkám (tzv. G-values), které se mohou nacházet v prostoru mezi jednotlivými vrty. Pro každou z těchto hodnot je vytvořen pravděpodobnostní model vytvořený dle pravidla inverzního čtverce (pravděpodobnost je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti). Poté program přiřadí finální uzlové hodnoty založené na hodnotách G-value dle nejvyšší pravděpodobnosti. Nevýhodou této metody je vyšší náročnost na hardware a s tím spojená delší doba modelování. Výhodou je její využitelnost nejen v litologickém modelování (2004-2017 RockWare, Inc. ©, 2017).

Metoda nejvyšší pravděpodobnosti dále nabízí pokročilé možnosti modelování, které slouží ke zpřesnění výsledného modelu: Použity byly:

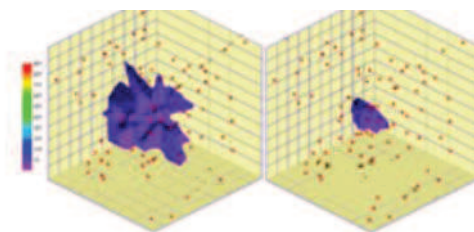
1. **Rozptylování (Declustering):** Převádí shluky bodů na jediný bod pomocí předběžného vytváření modelové mřížky a rozdělení modelu na jednotlivé buňky. Tím se zabráňuje duplikování dat. Tato možnost je ve výchozím nastavení používána a pro modelování byla ponechána.



Obrázek 7. Princip rozptylování
(RockWorks)

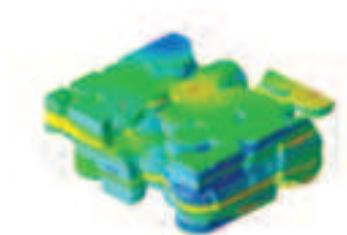
2. **Logaritmování (Logarithm):** Použití je výhodné při modelování prostředí s vysoce anomálními daty. Kontrolní body G-hodnot jsou převedeny na přirozené logaritmy. Model je interpolován a poté jsou kontrolní body převedeny zpět.

Tato možnost je ve výchozím nastavení používána a pro modelování byla ponechána.



Obrázek 8. Princip logaritmování. Vlevo bez, vpravo s logaritmováním. (RockWorks)

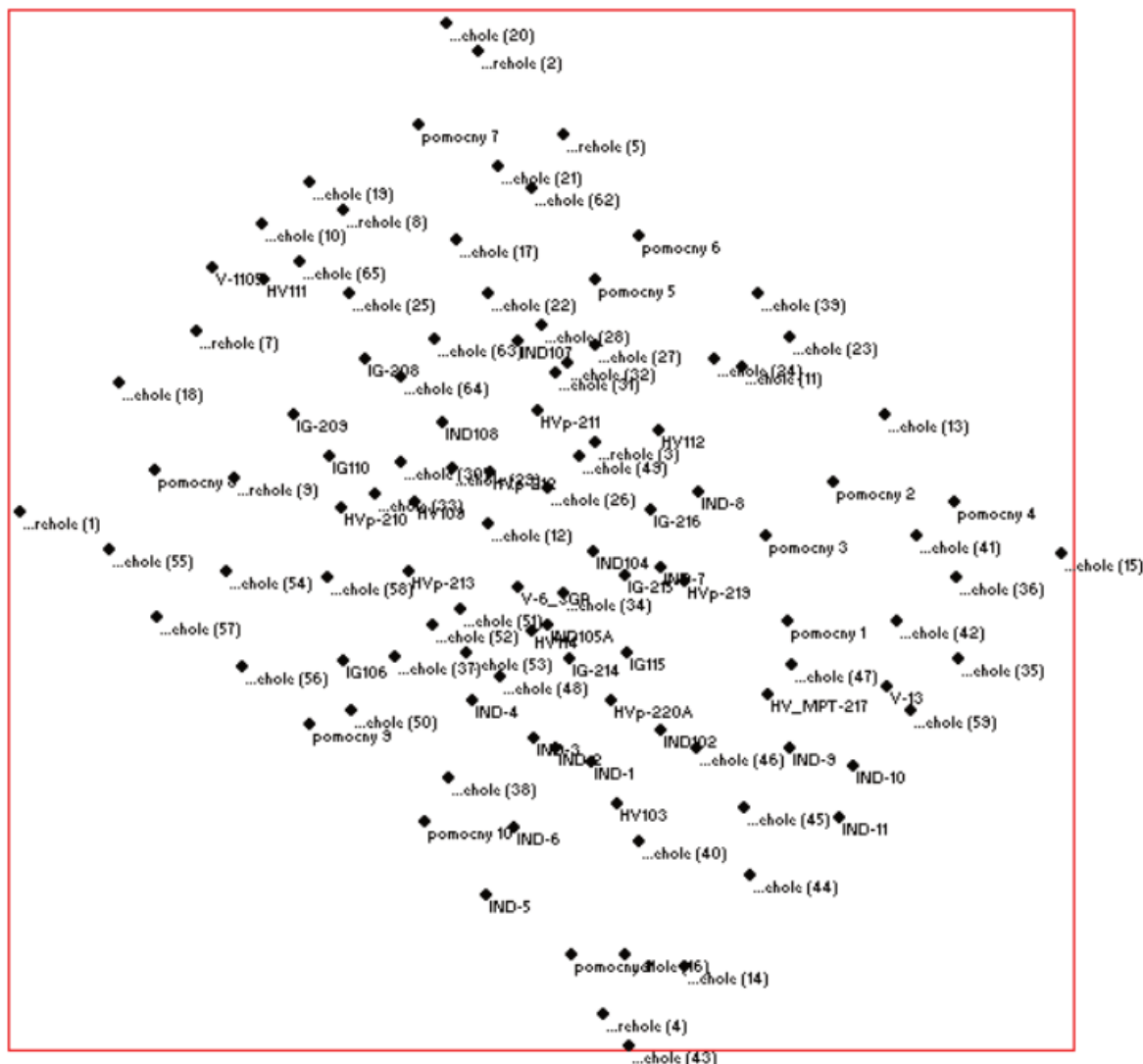
3. **Omezení vzdálenosti (Distance filter):** Pokud je aktivováno, filtr zakazuje modelování v daném bodě na základě dat z vrtů od zadané vzdálenosti. Omezení vzdálenosti může být horizontální nebo vertikální a může být definováno buď v absolutní vzdálenosti nebo dle velikosti modelované oblasti. Tato možnost není ve výchozím nastavení používána.



Obrázek 9. Litologický model s aktivovaným omezením vzdálenosti (RockWorks)

Pro litologické modelování byl využit horizontální filtr vzdálenosti. Maximální modelovaná vzdálenost od jednoho vrtu byla stanovena na 60 metrů. I s využitím této poměrně vysoké hodnoty se však v litologickém modelu nacházely nežádoucí mezery. Interpolací hodnot tří nejbližších skutečných, nebo už dříve uměle vytvořených vrtů (borehole_xx) bylo v RockWorks vytvořeno dalších 11 pomocných vrtů označených „pomocny_xx“, které tyto mezery zaplnily. Pokud se některé litologické vrstvy v některých ze tří interpolovaných vrtů nacházely a v jiných nenacházely, bylo bráno, že se daná litologická vrstva ve vytvářeném vrtu vždy nachází.

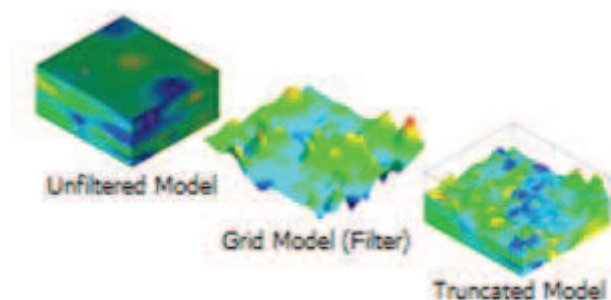
Mapa všech využitých vrtů pro litologické modelování je na obrázku 10. Tato mapa je orientována na sever – RockWorks modelovanou oblast umísťuje vždy do takto orientovaného čtverce. Sesuv proběhl ve směru ze severozápadu na jihovýchod.



Obrázek 10. Rozložení vrtů využitých pro litologické modelování (RockWorks)

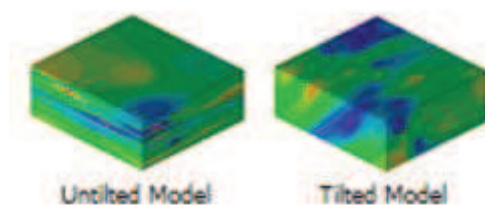
4. **Definování povrchu (Surface):** Pokud je tato možnost aktivována, program vytváří povrch modelu, a to buď automaticky na základě nadmořských výšek jednotlivých vrtů nebo dle uživatelem vytvořeného souboru. Pokud je tato možnost deaktivována, je povrch modelu konstantní dle nejvyšší nadmořské výšky ze všech vrtů. Prostor nad vrty s nižší nadmořskou výškou je definován dle nejsvrchnější známé litologické informace v daném místě. Tato možnost je ve výchozím nastavení využívána.

Pro účely modelování byly poskytnuty modely reliéfu zájmové oblasti, které byly úspěšně importovány do softwaru RockWorks. Tento model však s litologickým modelem povrchu nebyl spojován. Modely povrchu tedy byly do litologického modelu zavedeny jiným způsobem – popsáno níže. Byla ponechána možnost vytvářet povrch automaticky z nadmořských výšek jednotlivých vrtů.



Obrázek 11. Princip definice povrchu modelu. Vlevo - možnost je zakázána, uprostřed - model dle kterého je povrch utvářen, Vpravo - Model s definovaným povrchem (RockWorks)

5. **Definování základny (Subface):** Funguje obdobně jako možnost „superface“ pro základnu vytvářeného modelu, s tím že pracuje s nadmořskými výškami spodků vrtů. Tato možnost je ve výchozím nastavení využívána. Stejně jako u definování povrchu byla ponechána možnost jeho automatického vytvoření.
6. **Naklonění (Tilting):** Tato možnost nakloní všechny modelované litologické vrstvy pod daným úhlem a v daném směru. Tato možnost není ve výchozím nastavení využívána.



Obrázek 12. Porovnání modelování bez využití naklonění (vlevo) a s využitím (vpravo) (RockWorks)

Jedná se pro tuto oblast o klíčovou možnost litologického modelování. Vrstvy jsou uloženy pod úhlem 7 stupňů směrem na jihovýchod (vliv toku řeky Labe) (Copyright © 2010 ČÚZK). Tohoto náklonu dosahují vrstvy pouze v oblasti pod vrcholem Kubačka, který je tvořen neogenními bazalty. Pod vrcholem Kubačka jsou vrstvy uloženy téměř horizontálně, případně dosahují opačného sklonu na severozápad. Vzhledem k tomu, že sesuv na dálnici D8 se týká především kvartérních sedimentů uložených právě pod úhlem 7 stupňů, má tato skutečnost na další postup pouze zanedbatelný vliv a v další úpravě

výstupů je alespoň vizuálně eliminována. Naklonění tedy definováno pod úhlem 7 stupňů ve směru 310 stupňů (na jihovýchod – zadaný úhel nemusí odpovídat běžné praxi).

Stratigrafické modelování proběhlo pouze jako orientační a nebyla využita žádná složitější nastavení kromě jediného – **pořadí a návaznost vytváření jednotlivých vrstev (Modeling sequence)**: Ve výchozím nastavení RockWorks používá pořadí modelování „Base to top“. Modelují se jednotlivé vrstvy od podloží do nadloží a případné nepřesnosti (mezery, překryvy) jsou automaticky opraveny. Pro opravu je pro pořadí „Base to top“ využita vždy podložní vrstva v místě dané nepřesnosti. Tento postup byl pro stratigrafické modelování vypnut a stratigrafické formace byly modelovány nezávisle. Tak se sice neeliminují nepřesnosti v modelu, vytvořené plochy jsou však použitelné pro litologické modelování.

Jelikož byly pro litologické modelování poskytnuty také modely povrchu, bylo třeba v RockWorks vytvořit síťové soubory, které tyto povrchy reprezentují. Při vytváření sítí nebyly využity žádné pokročilejší postupy – oproti výchozímu nastavení byla všechna rozšíření vypnuta. Bylo tak učiněno z toho důvodu, že poskytnuté modely byly značně detailní – síť bodů 1x1 m jejichž počet dosahoval téměř 300 000. Nebylo proto žádoucí, aby byly tyto modely RockWorksem jakkoli upravovány. Týká se to především **vyhlazování** sítí. Pokud by tato možnost byla ponechána, pak by detailnější útvary, jako odřez dálnice D8, byly vyhlazeny a nebyly nadále rozpoznatelné. Vyhlazení bylo nutné vypnout i při samotném vložení modelu povrchu do litologického modelu.

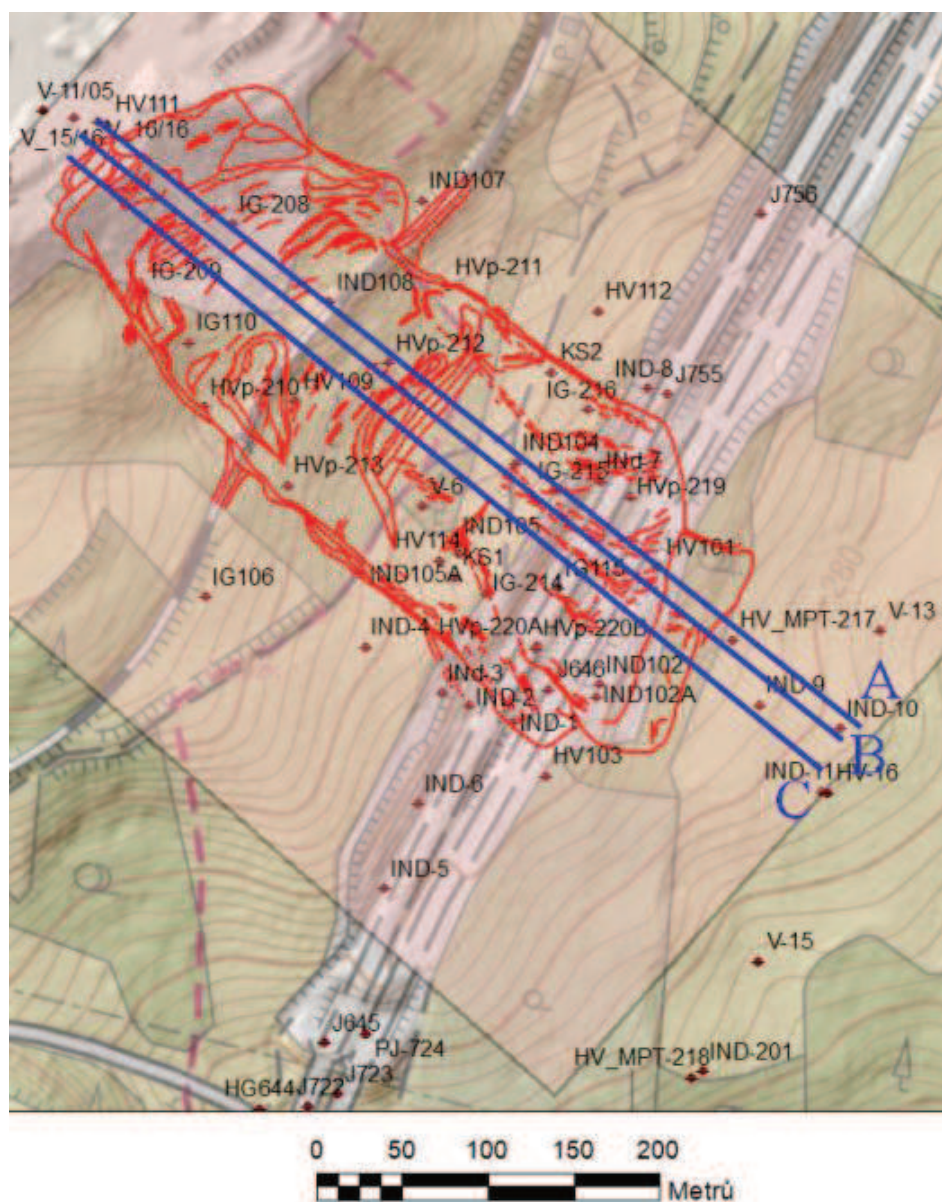
Při litologickém modelování byly povrchy využity, při samotném vytváření litologického modelu softwarem ovšem nebyly primárně zohledněny. Linie povrchu byla pouze vizuálně zavedena do vytvořených litologických řezů (nikoli 3D modelů – ty v tomto případě slouží pouze pro obecnější přehled geologické situace). Litologický model tak byl vytvářen pouze na základě dat z vrtů. Kdyby byl povrch v litologickém modelování zohledněn, mohlo by dojít ke značnému zkreslení mocnosti povrchových litologických vrstev. Proto je toto řešení vhodnější.

Pro litologické modelování bylo také klíčové stanovit, s jakou velikostí buněk má program pracovat. Litologický model na rozdíl od toho stratigrafického nevytváří spojitě plochy, ale pracuje pouze s buňkami, stanovení jejich velikosti je tedy pro přesnost výsledku klíčové. Výchozí nastavení je velikost buňky 10x10 metrů o výšce 1 metr. Vzhledem k hardwarovým možnostem byla jako dostatečná stanovena velikost buňky 7x7 metrů o výšce 0,5 metru.

Hlavním úkolem litologického modelování bylo vytvoření několika litologických řezů oblasti sesuvu, se kterými bylo dále pracováno. Jejich lokalizace v SS S-JTSK je následující:

Řez	Počáteční bod (m)		Koncový bod (m)	
	X	Y	X	Y
A	-764311	-986388	-763859	-986774
B	-764331	-986400	-763878	-986793
C	-764349	-986424	-763984	-986816

Tabulka 4. Lokalizace litologických řezů

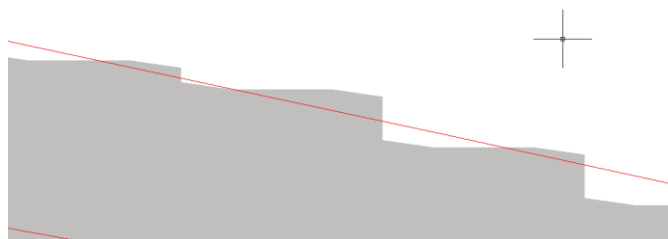


Obrázek 12. Vedení litologických řezů
Modrá – řezy; Červená – sesuv dle ČGS

2.3 Metodika transformace IG modelu do geotechnického výpočetního modelu

Pro další pracovní postup bylo nutné v softwaru RockWorks vytvořit litologické řezy, které byly následně použity pro stabilitní posouzení zájmové oblasti. Vytvořené řezy byly exportovány do softwaru AUTOCAD 2014. Posuzovány na stabilitu byly dva řezy označené jako A a C (viz obrázek 12). Řez B na stabilitu posuzován nebyl.

Pro vytvoření spojitých křivek reprezentující jednotlivá litologická rozhraní byla využita funkce „spline“. Jako referenční body byly obvykle brány středy okrajů vytvořených buněk. U vrstev s nižší mocností se vycházelo z průběhu litologických rozhraní vrstev v jejich podloží a z namodelovaných mocností. Pomocí funkce „splinedit“ s přesností o hodnotě „2“ byly následně křivky převedeny na polygony.

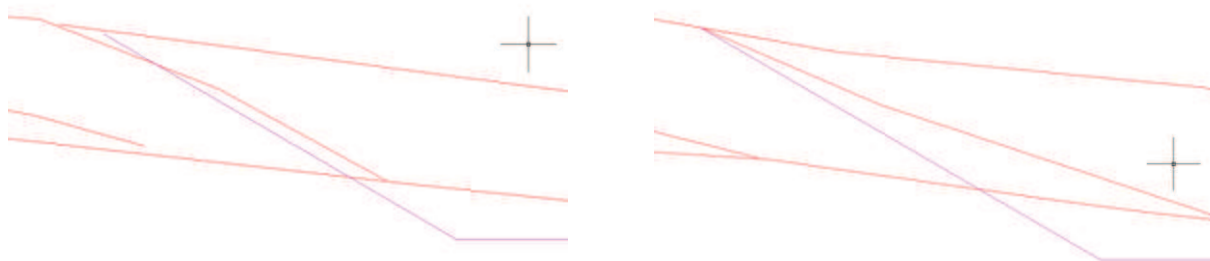


Obrázek 13. Způsob vytváření spojitých litologických rozhraní (červená)

Do řezů byl také zaveden profil odřezu dálnice D8. Jeho geometrické parametry jsou přiloženy v přílohách 7 a 8. Při jejich stanovení se vycházelo z poskytnutého geologického řezu, který byl proveden v bezprostřední blízkosti vytvořených litologických řezů A a C. Při jeho zavádění do namodelovaných řezů byl brán v úvahu hlavně fakt, že odřezem dálnice D8 byly přerušeny všechny kvartérní vrstvy. Umístění odřezu bylo zjevné z vytvořeného povrchu terénu.

V tomto stádiu následně prošly litologické řezy dodatečnou úpravou nepřesností. Pro snadnější postup posouzení stability byla jednotlivá litologická rozhraní upravena tak, aby na sebe

navazovala v hranách polygonů. Zejména v oblasti odřezu dálnice D8 tak byly eliminovány některé dílčí oblasti, které by na stabilitní výpočet měly pouze zanedbatelný vliv.



Obrázek 14. Porovnání litologických rozhraní před (vpravo) a po úpravě pro stabilitní výpočty (vlevo)
Červená – litologická rozhraní
Fialová – odřez dálnice D8

Pomocí funkce „boundary“ byly z polygonů vytvořeny uzavřené oblasti. V tomto stavu jsou řezy připraveny pro posouzení stability. Výkresy litologických řezů jsou přiloženy v příloze 5 a 6.

2.4 Metodika posouzení stability zájmové oblasti

Pro posouzení stability zájmové oblasti bylo využito metody konečných prvků. Pro výpočet byl použit software PLAXIS 2D.

2.4.1 Vstupní data

Pro geometrii byly využity litologické řezy, jejichž tvorba byla popsána v kapitolách 2.3, 7 a 8. Přípravené podklady vytvořené v softwaru AUTOCAD ve formátu .dxf byly importovány do výpočetního programu. V samotném PLAXISu neproběhla žádná dodatečná úprava geometrie.

V PLAXISu bylo pracováno se stejnými litologickými celky jako v RockWorks. Pro výpočet stability byl využit Mohr-Coulombův materiálový model a na základě požadavku vstupních parametrů byly jednotlivým litologickým celkům nejdříve přiřazeny následující výchozí parametry:

Název	Barva	γ_{unsat} (kN*m ⁻³)	γ_{sat} (kN*m ⁻³)	E (kPa)	ν (-)	c (kPa)	ϕ (°)
Svrchní jemnozrnné deluvium		19	21	8000	0.4	15	23
Hrubozrnné deluvium		19	20	35000	0.35	5	30
Spodní jemnozrnné deluvium		18.5	20.5	5000	0.35	1	13
Bazalt		27	27	3E+06	0.2	1000	46
Tuf		20	21	40000	0.35	15	25
Zvětralý slínovec		20	21	15000	0.4	40	25
Slínovec		21	21	250000	0.25	50	38

Tabulka 5. Parametry hornin (červená – později upravené parametry)

Při prvních pokusech o stabilitní analýzu vytvořených litologických řezů se ukázalo, že některé zadané pevnostní parametry jsou nedostatečné. Spodní jemnozrnné deluvium, které hrálo při sesuvu na dálnici D8 klíčovou roli, má své pevnostní parametry tak nízké, že PLAXIS není schopen stabilitní analýzu provést, jelikož ke kolapsu svahu dojde už v prvotních fázích výpočtu. Nejnížší hodnoty, při kterých byl výpočet schopen dokonvergovat, jsou:

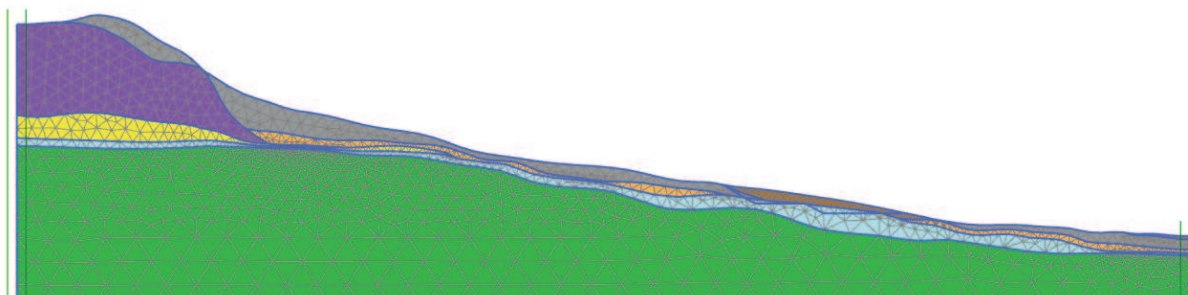
Název	Barva	γ_{unsat} (kN*m ⁻³)	γ_{sat} (kN*m ⁻³)	E (kPa)	ν (-)	c (kPa)	ϕ (°)
Spodní jemnozrnné deluvium		18.5	20.5	5000	0.35	2	16

Tabulka 6. Upravené parametry hornin

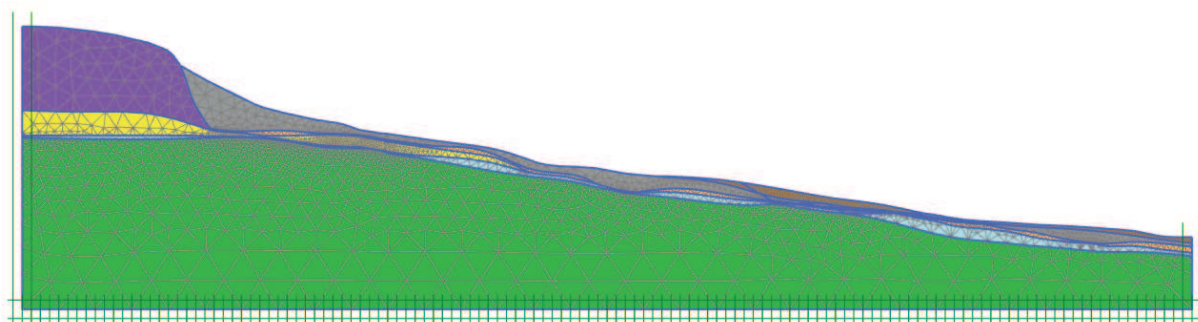
Pro řezy A a C se zvyšované parametry spodního jemnozrnného deluvia mírně lišily – pro oba řezy byly použity upravené hodnoty pro řez C, které byly mírně vyšší.

2.4.2 Síť (Mesh)

Síť byla pro oba řezy zvolena jako velmi jemná (very fine), a to vzhledem k relativně nízkým mocnostem některých litologických vrstev v kontextu velikosti celého modelu a vzhledem k roli, jakou hrály v problému sesuvu na dálnici D8.



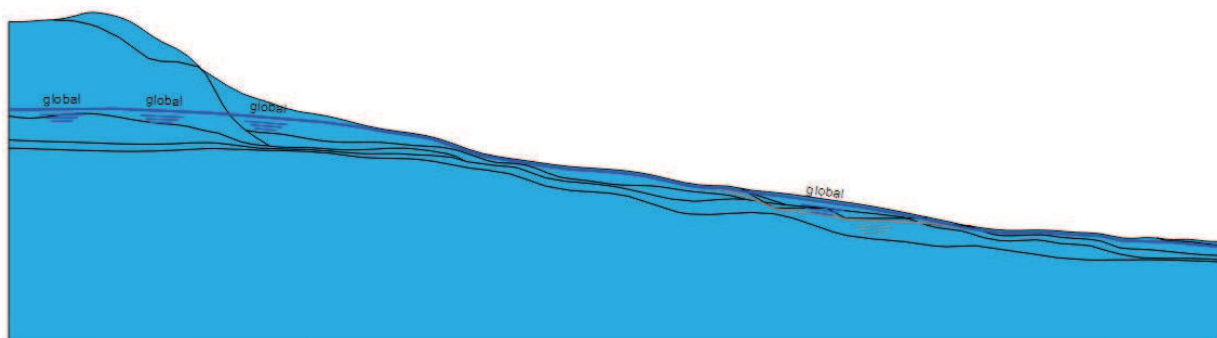
Obrázek 15. Vygenerovaná síť pro řez A (Nástroje: PLAXIS 2D)



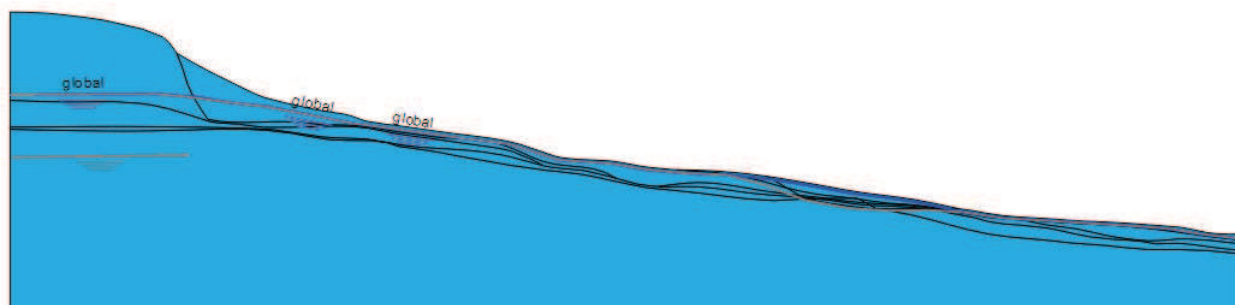
Obrázek 16. Vygenerovaná síť pro řez C

2.4.3 Parametry podzemní vody (Flow Conditions)

Pro oba řezy byla do výpočtu nadefinována hladina podzemní vody (v obrázcích 17 a 18 označeno jako *global*). V oblasti výskytu kvartérních sedimentů se nachází zhruba 1 metr pod povrchem. V oblasti výskytu neovulkanitů se nachází několik metrů nad litologickým rozhraním bazaltů a tufů. Jak se hladina podzemní vody mění v souvislosti s vybudováním odřezu dálnice D8, je popsáno v popisu fází výpočtu. V souvislosti s výskytem podzemní vody jsou všechny horniny a zeminy zavedené do výpočtu definovány jako **nedrénované (undrained)** – pracuje se s efektivními parametry (© Plaxis 2017).



Obrázek 17. Hladina podzemní vody v iniciační fázi v řezu A (Nástroje: PLAXIS 2D)

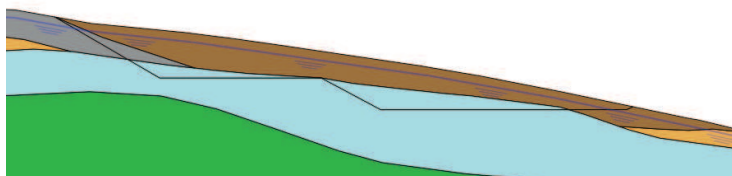


Obrázek 18. Hladina podzemní vody v iniciační fázi v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)

2.4.4 Způsob výpočtu (Staged Construction)

Stabilitní výpočet pro oba řezy proběhl v následujících fázích tak, aby postihnul reálný vývoj před sesuvem:

- **Iniciační fáze** – V této fázi proběhl výpočet stavu napjatosti ve svahu před provedením odřezu dálnice D8.



Obrázek 19. Detail geometrie řezu A před odřezem (Nástroje: PLAXIS 2D)



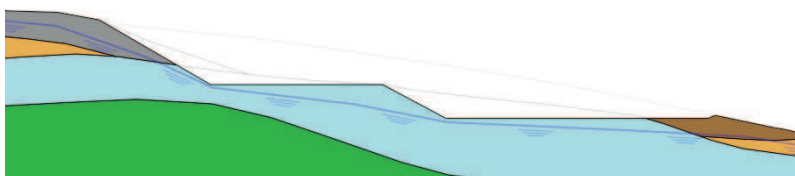
Obrázek 13. Detail geometrie řezu C před odřezem (Nástroje: PLAXIS 2D)

Oproti výchozímu nastavení byl změněn jediný parametr:

- Typ výpočtu (Calculation type) – Pro výpočet primárního stavu byla zvolena metoda „Gravity loading“, která je oproti výchozí metodě „K0 Procedure“ vhodnější pro náročnější geometrické útvary, kdy jsou do výpočtu zahrnuty i boční tlaky. K0 Procedure se využívá pouze při horizontálně uložených vrstvách (© Plaxis 2017).

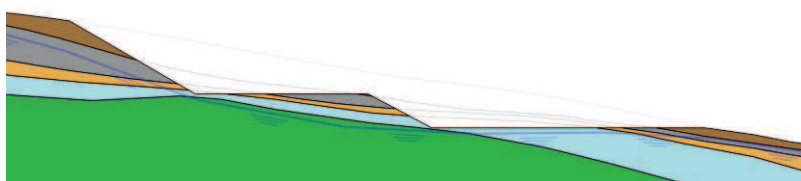
V této fázi byla nadefinována hladina podzemní vody tak, jak je popsána výše.

- **Fáze 1 – Plastický výpočet** – Jedná se o plastickou analýzu zadaných svahů bez uvažování konsolidace (© Plaxis 2017).



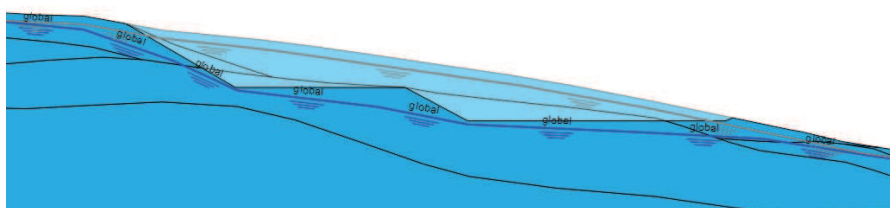
Obrázek 21. Detail odřezu dálnice D8 v řezu A (Nástroje: PLAXIS 2D)

V této fázi nebyly oproti výchozímu nastavení změněny žádné parametry.

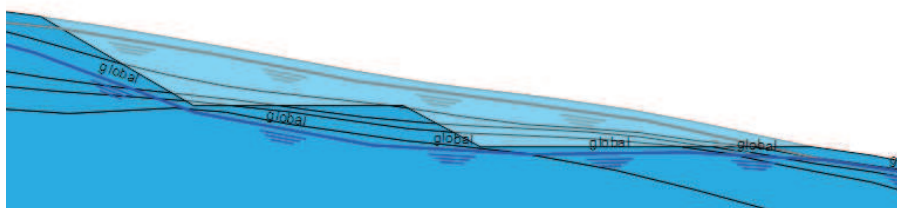


Obrázek 22. Detail odřezu dálnice D8 v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)

Podzemní voda do této fáze výpočtu vstupuje stejně jako do fáze iniciační, s výjimkou toho, že probíhá pod hranou zářezu dálnice D8 – důsledek odvodnění.



Obrázek 23. Detail hladiny podzemní vody v místě odřezu dálnice D8 v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)



Obrázek 24. Detail hladiny podzemní vody v místě odřezu po jeho provedení v řezu A (Nástroje: PLAXIS 2D)

- Fáze 2 – Posouzení bezpečnosti** – V této fázi proběhlo posouzení stability svahu metodou redukce pevnosti jednotlivých parametrů (P_{hi}/C reduction). Parametry sítě nejsou v této fázi nadále upravovány. Výsledek je prezentován ve formě součinitele bezpečnosti M_{sf} , který je dán jako poměr mezi počáteční a redukovanou pevností. Redukce probíhá automaticky. Výstup pro lokalizaci smykové ploch je výstup γ_s (total deviatoric strain) (© Plaxis 2017).

3. Charakteristika poloskalních hornin

Základní členění horninového prostředí je na tři základní typy:

- Skalní horniny,
- poloskalní horniny,
- zeminy.

O technicky nejvýznamnějších vlastnostech hlavní měrou rozhoduje pevnost strukturních vazeb mezi elementárními částicemi horniny. U pevnějších typů hornin se uplatňují především vazby krystalizační a cementační. Velká energie vazeb všech typů hornin z hlediska jejich vzniku (magmatické, metamorfované a sedimentační) podmiňuje velkou pevnost, malou stlačitelnost a velkou stálost skalních hornin. I horniny s o něco slabšími vazbami – poloskalní horniny – dosahují stále velmi příznivých fyzikálně mechanických vlastností. Lze je porovnat například s betonem (Pašek, 1995).

Jednotlivé typy hornin se dále člení do tříd pevnosti, které se označují jako R0-R6 (ČSN 72 1002/1990; ČSN 73 1001/1988). Tato norma byla zrušena roku 2004 a byla nahrazena normou ČSN EN ISO 14689-1. ČSN 73 1001 je však jediná norma, ve které je pojem „poloskalní hornina“ definován.

Třída pevnosti	Pevnost v jednoosém tlaku (Mpa)	
R0	>250	Skalní horniny
R1	150-250	
R2	50-150	
R3	15-50	Poloskalní horniny
R4	5-15	
R5	1.5-5	
R6	<1.5	Zeminy

Tabulka 7. Pevnostní třídy hornin dle ČSN 73 1001

Poloskalní horniny dosahují pevnosti v jednoosém tlaku 50 – 1,5 MPa. Tabulka 7 - dané hranice jsou do značné míry orientační (Pašek, 1995).

Poloskalní horniny se tudíž dají charakterizovat jako přechod mezi skalními horninami a zeminami. Jejich původ je v zásadě dvojitý:

Diagenese – Proces vzniku nových zpevněných hornin vlivem stlačení (tzv. kompakce) a postupnou ztrátou vlhkosti vlivem tlaku nadloží. Pokud tento proces probíhá v nových fyzikálně – chemických podmínkách, nazývá se také **epigenese** (Pašek, 1995). Jedná se o první fázi procesu zvaného cementace (Nickmann et. al., 2006), která může vést až k vytvoření hornin klasifikovatelných do pevnostních tříd R2 a výše.

Typickými zástupci jsou:

- Slepenec – psefitická hornina, která vzniká stmelěním štěrků s polozaoblenými a zaoblenými úlomky, obvykle po delším transportu i během několika geologických období. Krom valounů obsahují písčité nebo štěrkovitý matrix a např. křemenný nebo karbonátový tmel.
- Pískovec – psamitická hornina, jejichž podstatnou část zrn o velikosti 0,06 – 2 mm tvoří křemen. Ten je obvykle tmelen křemitým nebo kaolinickým tmelem.
- Prachovec – aleuritická hornina, jejichž podstatnou část tvoří zrna o velikosti 0,06 – 0,002 mm. Prachové částice jsou obvykle tvořeny křemeny, živci a slídami.
- Jílovec – pelitická hornina, jejichž podstatnou část tvoří zrna o velikosti menší než 0,002 mm tvořené jílovými minerály.
- Slínovec – pelitická hornina podobná jílovcu. Na rozdíl od jílovce však obsahuje kalcit – reaguje tak s kyselinou chlorovodíkovou.

(Pašek, 1995; © Česká geologická služba 2007)

Zvětrávání – Proces, kdy dochází k působení mechanických, fyzikálních, chemických nebo biologických sil na obnažené horniny. Jako poloskalní může být klasifikována téměř jakákoli hornina v závislosti na stupni jejího zvětrání (viz níže – charakteristika pevnostních tříd poloskalních hornin). Zvětrávání hornin může vést až k úplnému rozpadu horniny a vytvoření sypkých zemin (Nickmann et. al. 2006).

- **Zdravá hornina** – rozvolnění pouze podél existujících puklin, bez znaků chemických přeměn.

- **Slabě zvětralá** – oslabena strukturní soudržnost, vznik puklin zvětráváním, podél puklin mohou být minerály rozloženy, pukliny mohou být částečně vyplněny produkty zvětrání.
- **Mírně zvětralá** – rozpad na bloky a úlomky, původní struktura zachována, povrch bloků je chemicky narušen a pukliny jsou vyplněny.
- **Velmi zvětralá** – úplný rozpad na drobné úlomky oddělené zvětralinou, většina minerálů je rozložena.
- **Zcela zvětralá** – úplné rozdrobení na písčité až šterkovité eluvium s případnými úlomky. Charakteristika masivu je ještě patrná.
- **Eluvium** – úplné rozdrobení horniny na zeminu. Charakteristika masivu je zničena.
(ČSN EN ISO 14689-1)

Dle zrušené ČSN 73 1001 poloskalní horniny spadají do pevnostních tříd R3-R5 (viz tabulka 7). Tyto třídy jsou charakterizovány a reprezentovány horninami:

- **R3**
 - Stupeň pevnosti: střední,
 - horninu lze kladívkem lehce rozbít,
 - zdravé: jílovce, slínovce, tufy,
 - navětralé: Vápence, slepence, pískovce, droby, fylity,
 - mírně zvětralé: Granitoidy, diority, gabra.
- **R4**
 - Stupeň pevnosti: nízký,
 - horninu lze rýpat nožem,
 - zdravé: slabě zpevněné jílovce, pískovce, prachovce, tufity,
 - navětralé: jílovce, slínovce, tufy,
 - zvětralé: Vápence, slepence, pískovce, droby, fylity,
- **R5**
 - Stupeň pevnosti: velmi nízký,
 - horninu lze rozbít rukou,
 - zdravé: velmi slabě zpevněné jílovce, prachovce, pískovce, tufity,
 - navětralé a mírně zvětralé: slabě zpevněné jílovce, pískovce, prachovce, tufity,
 - silně zvětralé: jílovce, slínovce, tufy,
 - zcela zvětralé: Vápence, slepence, pískovce, droby, fylity,



Obrázek 25. Jílovec (© Česká geologická služba 2007)



Obrázek 146. Zvětralý granit (© Česká geologická služba 2007)



Obrázek 27. Slínovec (© Česká geologická služba 2007)

4. Smyková pevnost poloskalních hornin

Vzhledem k tomu, že pojem „poloskalní hornina“ není kromě už neplatné normy ČSN 73 1001 nijak v dalších normách zakotven, je značná část následujících informací platná jak pro skalní, tak pro poloskalní horniny.

U celistvé horniny bez výskytu diskontinuit je základním zdrojem pevnosti její soudržnost. Hornina je ovšem zpravidla diskontinuity obsahuje a ty primárně definují její at' už smykovou, nebo celkovou pevnost. Jedná se o vrstevní plochy, plochy břidličnatosti, pukliny a trhliny a smykové plochy. Diskontinuity oslabují soudržnost horniny, jsou však nositeli odporu daného třením (Mencl, 1966).

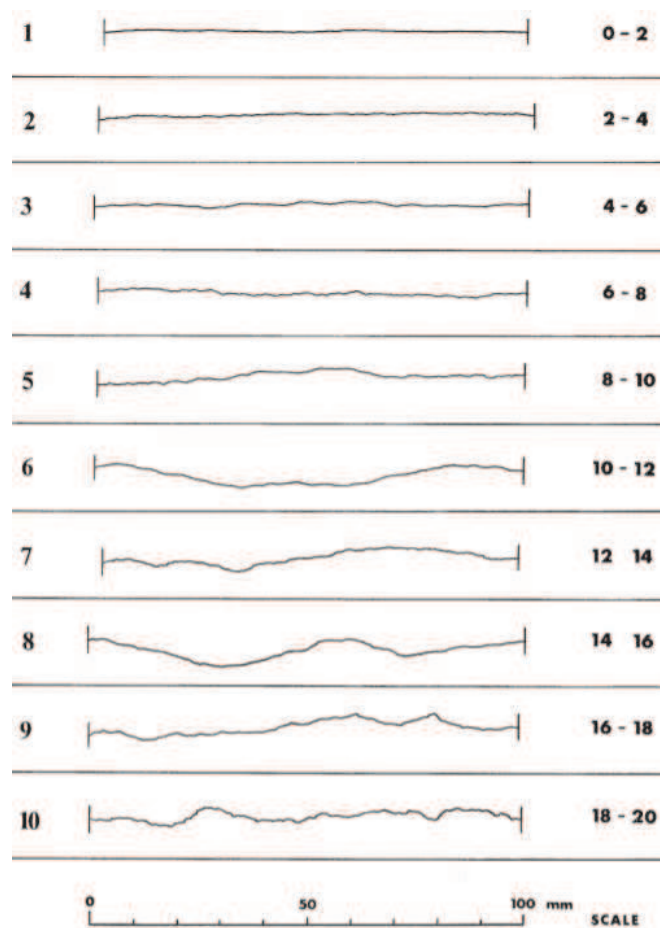
O tom, jakým způsobem a kdy se tyto třecí síly uplatní, rozhoduje charakter diskontinuit. Pokud jsou diskontinuity malé, může se uplatnit až poté, co dojde k vyčerpání soudržnosti v celistvých blocích horniny. Pokud jsou ovšem diskontinuity významnějšího charakteru, tj. rozevřenější apod., je umožněn pohyb bloků horniny. To oddálí mobilizaci strukturní pevnosti v hornině a tím je také tření menší. Smyková pevnost horniny tedy závisí na několika faktorech:

- Podíl soudržnosti a tření při čerpání pevnosti horniny,
- vlastní pevnostní charakteristiky horniny.
 - Soudržnost,
 - odolnost proti vtlačování – uplatnění zejména při pohybu bloků v rámci horniny,
 - velikost zrn (pískovce, jílovce, prachovce) – čím větší zrna, tím menší pevnost,
 - pórovitost – póry oslabují horninovou hmotu, a také umožňují nasycení vodou, u poloskalních hornin dosahuje 20-23 %.
 - Nasycenost vodou – nasycení snižuje u poloskalních hornin pevnost až o 25 % jednak účinkem tlaku vody, jednak vlivem vody na vazby mezi zrna.
- Dilatance hornin – tokové chování materiálu, které nastává při vysokých silách na něj působících,

- charakter diskontinuit v hornině – četnost, orientace, rozevření, průběžnost, charakter výplně, drsnost povrchu diskontinuit.

(Mencl, 1966)

- Drsnost povrchu diskontinuit je jedním z nejdůležitějších parametrů, je charakterizována součinitelem JRC (joint roughness coefficient) (Barton, 1973).



Obrázek 28. Příklady přiřazení koeficientu JRC (Barton, 1973)

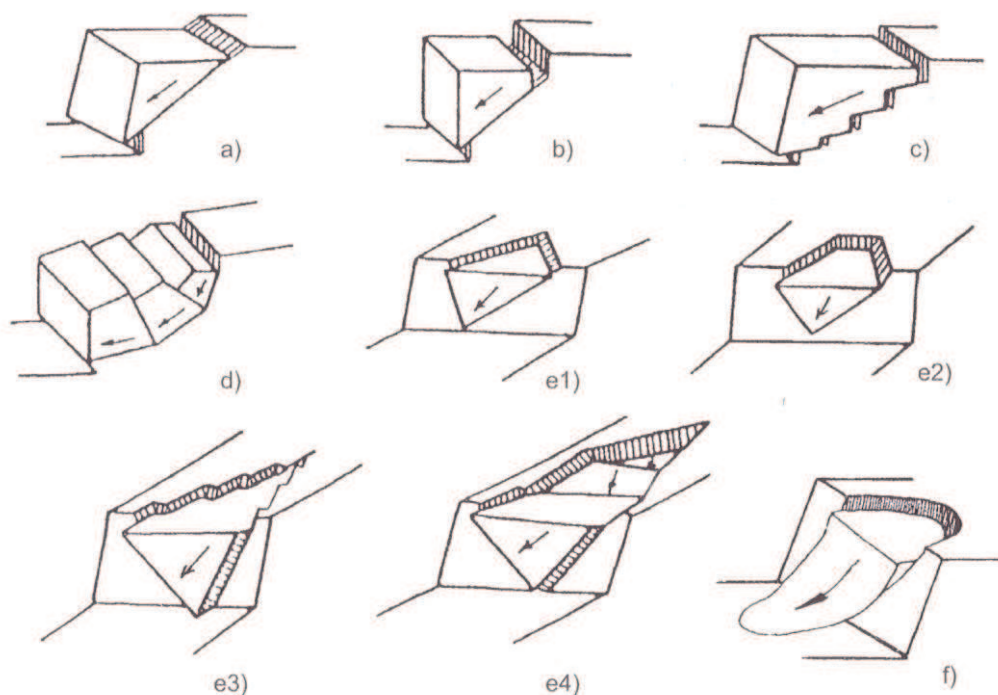
Existence diskontinuit, což je u poloskalních hornin téměř jistým pravidlem, znamená v horninovém masivu prakticky vždy předurčené plochy porušení nebo oslabení.

- Jednoduché rovinné sesunutí** – Tento stav nastává, pokud je systém diskontinuit ukloněn ve stejném směru jako potenciální směr sesuvu. Pokud jsou diskontinuity průběžné, počáteční smyková pevnost horniny se uvažuje jako nulová.
- Sesunutí po rovinné kluzné ploše ukončené tahovou trhlinou** – Situace je podobná jako v předešlém případě, potenciální smyková plocha je ale omezena smykovou trhlinou. To

může nastat např. tehdy, pokud je povrch terénu narušen trhlinami, které se mohou zaplnit vodou apod.

- c. **Sesunutí po stupňovité smykové ploše** – tato situace nastává, pokud se v hornině nachází více různě ukloněných systémů puklin. Tato smyková plocha lze ve výpočtech nahradit tzv. efektivní smykovou plochou, která je jednou zalomena pod stejným úhlem a kde délky původních ploch odpovídají.
- d. **Sesunutí po polygonální smykové ploše** – nastává, pokud sesouvající blok horniny je narušen diskontinuitami a každý se sesune po dílčí smykové ploše.
- e. **Sesunutí horninových klínů**
 1. Jednoduchý klín, který vzniká kombinací dvou šikmých systémů diskontinuit protiklonně upadajících od povrchu bočních stran svahu,
 2. jednoduchý klín ukončený tahovou trhlinou,
 3. sesunutí horninového klínu po stupňovité kluzné ploše,
 4. sesunutí horninového klínu po polygonální smykové ploše.
- f. **Sesunutí po rotační smykové ploše** – nastává, pokud je sesouvající hornina vysoce úlomkovitá a rozrušená.

(Fussgänger, 2016)



Obrázek 29. Způsoby porušení smykem skalních a poloskalních hornin (Fussgänger, 2016)

5. Geomorfologické členění a zařazení

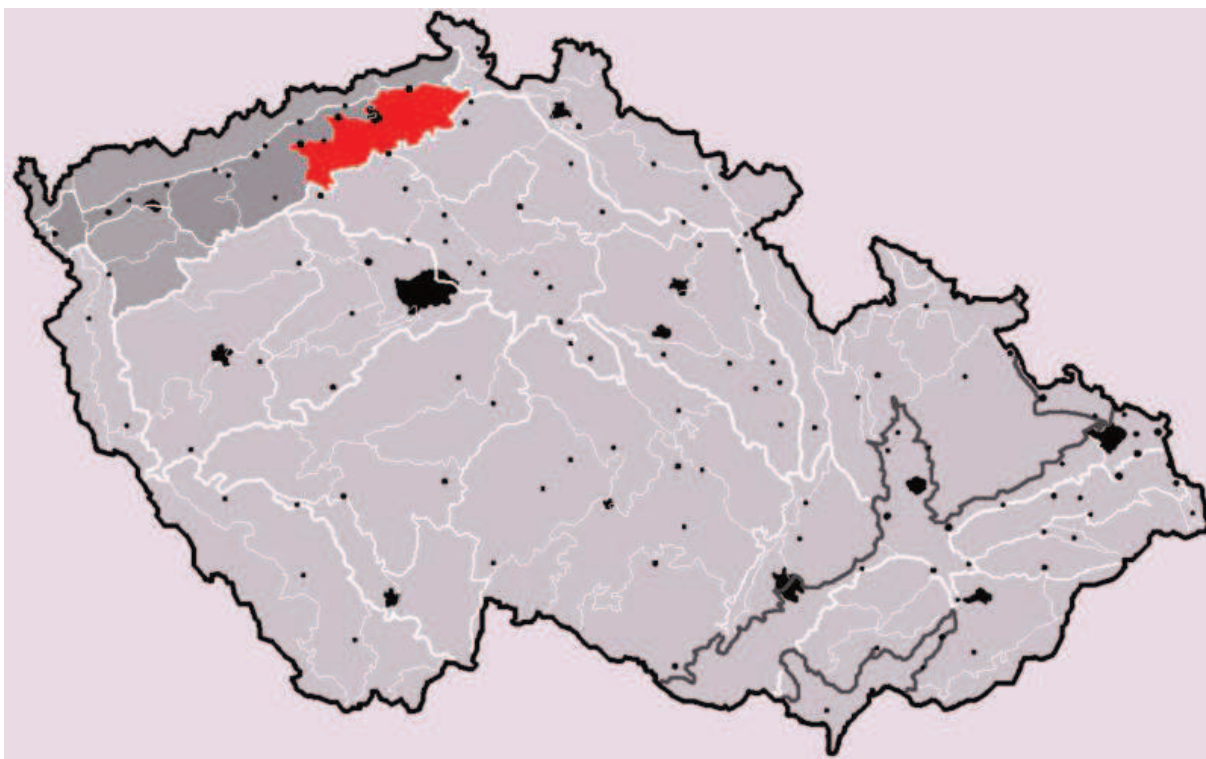
Zájmová oblast sesuvu náleží do největší geologické oblasti na našem území – geomorfologická provincie Česká vysočina. Ta náleží do geomorfologického subsystému Hercynského pohoří. Hercynské pohoří náleží do Hercynského systému (Dermek et al.,1987).

Česká vysočina zabírá zhruba tři čtvrtiny území České republiky a zasahuje i na území sousedních států. Zbytek území České republiky zabírají provincie západní Karpaty, Západopanonská pánev a Středoevropská nížina. Česká vysočina se následně dělí na tyto subprovincie: Krušnohorská, Krkonošsko-jesenická (Sudety), Česká tabule, Poberounská, Šumavská a Česko-Moravská. Zájmová oblast leží v severozápadních Čechách a náleží tedy do území Krušnohorské subprovincie (Dermek et al.,1987).

Krušnohorská subprovincie (také Krušnohorská soustava) leží v severozápadních Čechách a rozkládá se také na území německých spolkových států Bavorsko a Sasko. Dělí se na geomorfologické oblasti Krušnohorská hornatina, Podkrušnohorská oblast a Karlovarská vrchovina. Zájmové území náleží do oblasti Podkrušnohorské. Podkrušnohorská oblast leží téměř výhradně na území České republiky. Dělí se na následující geomorfologické celky: Chebská pánev, Sokolovská pánev, Doupovské hory, České středohoří a Mostecká pánev. Zájmová oblast náleží do geomorfologického celku České středohoří (Dermek et al.,1987).

Geomorfologický celek České středohoří zaujímá území o rozloze 1 266 km². Území se táhne v délce zhruba 70 km podél svahů Krušných hor. Na šířku má toto území zhruba 25 km. České středohoří je značně členitým územím – jedná se o oblast která byla v rámci území České republiky nejintenzivněji vystavena sopečné činnosti. Nejvyšším vrcholem je Milešovka (837 m n. m.), nejnižším bodem je tok řeky Labe v Děčíně (121,9 m n. m.). Průměrné roční teploty se pohybují mezi 9 a 5 stupni Celsia. Údolí toku řeky Labe dále dělí České středohoří na dva geomorfologické podcelky: Verneřické a Milešovské středohoří, do kterého spadá zájmová oblast (Dermek et al.,1987).

Milešovské středohoří se rozkládá na západním břehu řeky Labe. Dělí se na následující geomorfologické podcelky: Kostomlatské středohoří, Teplické středohoří, Bořeňské středohoří a Laňské středohoří. Zájmová oblast náleží do Kostomlatského středohoří (Dermek et al., 1987).



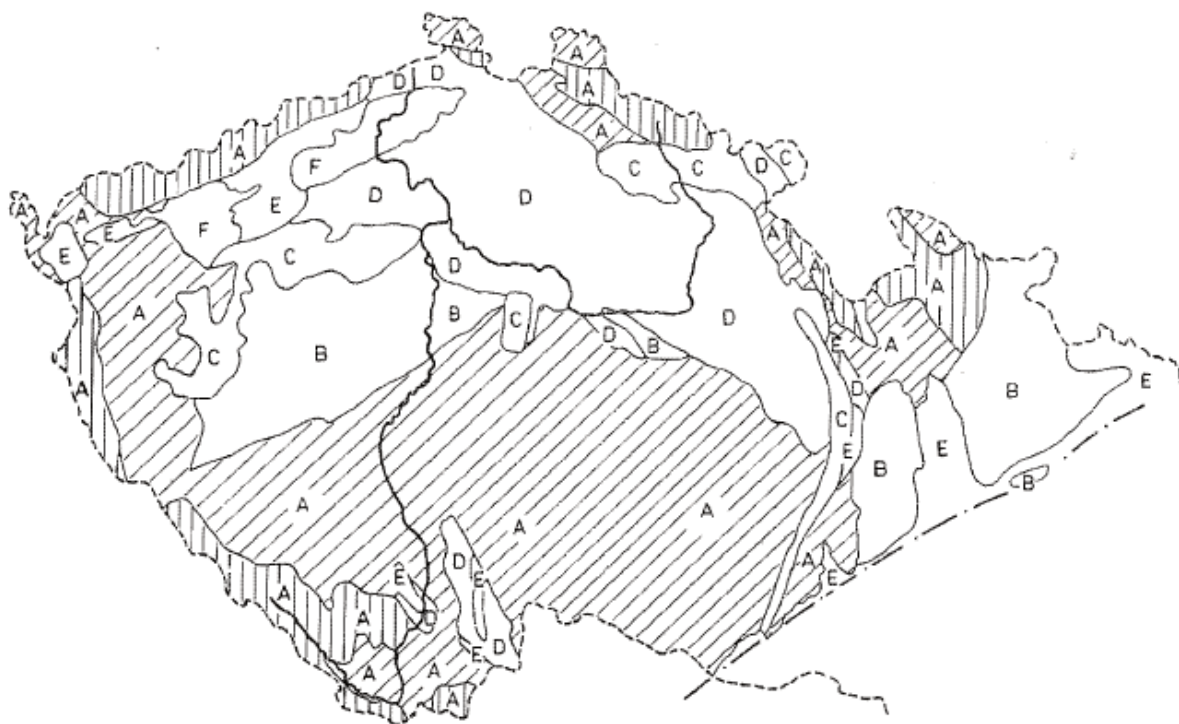
Obrázek 30. Vymezení Českého středohoří na území ČR (Matula, 1966)

6. Geologická stavba zájmové oblasti

Zájmová oblast spadá v nejširším pojetí do oblasti geologické jednotky Český masiv – jedné ze dvou hlavních geologických jednotek na území České republiky (tou druhou jsou Západní Karpaty).

Český masiv je jednou z nejrozsáhlejších a nejzachovalejších oblastí evropského hercynského (také variského) horstva, které vzniklo v období středního devonu až do svrchního karbonu před 380 až 300 miliony let. Jeho vývoj byl spojen s kolizí prvohorních kontinentů Laurasie a Gondwany.

Český masiv se v rámci území České republiky člení dle kritérií stejného geotektonického vývoje a geologické stavby na šest regionů (viz obrázek 31):



Obrázek 31. členění Českého masivu (Pašek, Matula, 1986)

Označení jednotlivých regionů dle obrázku 31:

- A – Region krystalinika,
- B – Region nemetamorfovaného předvarijského (předhercynského) podkladu,
- C – Region permokarbonských pánví,
- D – Region křídových pánví,
- E – Region terciérních depresí,
- F – Region neovulkanitů.

(Pašek, Matula, 1986)

Zájmová oblast spadá do regionu neovulkanitů. Podloží neovulkanitů v mnohém odpovídá regionu křídových pánví.

6.1 Hlubinný základ zájmové oblasti

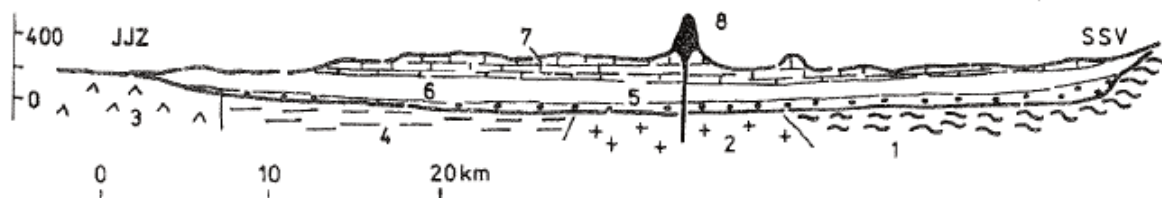
Hlubinný základ celého Českého masivu tvoří krystalinikum. Na něm se pak v rámci vlivu zaplavení pevniny mořem (tzv. transgrese), nebo vlivem sopečné aktivity objevují mladší geologické útvary.

Pojmem krystalinikum se rozumí obvykle podloží komplex krystalických, většinou metamorfovaných a magmatických hornin. V Evropě a Severní Americe je tvořeno hlavně granitoidními horninami hercynského a staršího kaledonského vrásnění. Používá se pro označení vrstev hornin pod sedimenty, pod platformním pokryvem nebo pod výplní pánví (© Česká geologická služba 2007).

6.2 Křídové formace

Sedimenty svrchní křídý se na území České republiky nachází ve dvou oddělených souvislých územních celcích. V severní polovině Čech a zčásti na severozápadní Moravě tvoří Českou křídovou pánev (také Českou křídovou tabuli), v jižních Čechách tvoří dvě oddělené jihočeské křídové pánve. Oba tyto celky se značně liší, jedná se tedy o dva odlišné subregiony (obrázek 31). Posuzovaná zájmová oblast se nachází v severozápadní části České křídové pánve, na které se následně projevovala vulkanická činnost (Pašek, Matula 1986).

Česká křídová pánev je největší sedimentační prostor na území České republiky, který se rozkládá od Děčína na severozápadě až po Železné hory na jihovýchodě v pásu širokém zhruba 50 – 80 km. Svrchnokřídové sedimenty vyplňují rozsáhlou plochou synklinálu, která je orientovaná od jihozápadu k severovýchodu (viz obrázek 32).



Obrázek 32. Profil České křídové pánve z jihojihozápadu na severoseverovýchod (Pašek, Matula, 1986)

- 1 – fylity
- 2 – granitoidy
- 3 – spility
- 4 – permokarbon
- 5 – cenoman
- 6 – turon spodní a střední
- 7 – coniak
- 8 – neovulkanity

Období svrchní křídy je doba před 100 – 66 miliony let. To se dále dělí na období maastricht, kampán, santon, coniak, turon a cenoman. Vznik České křídové tabule se datuje přibližně do období prvních tří z nich, tedy období cca před 100 – 86 miliony let (Fortey, 1999).

Bazální sedimenty České křídové tabule jsou sladkovodní hrubozrnné až střednězrnné pískovce s ojedinělým výskytem jílovců nebo nevýznamných uhelných vrstev. Vyšší, už křídová souvrství jsou mořského původu (Pašek, Matula, 1986). Na počátku svrchní křídy bylo území Čech (nikoli Moravy) naposledy zaplaveno mořem, kdy došlo ke globálnímu zdvihu mořské hladiny v důsledku podmořské vulkanické činnosti. Tzv. mořem Tethys byla zaplavena celá křídová pánev, která tehdy zabírala daleko větší území než její dnešní zbytek – sedimenty ukládané mořem byly později alpským vrásněním vyzdviženy a vrásněny (Chlupáč, 2002).

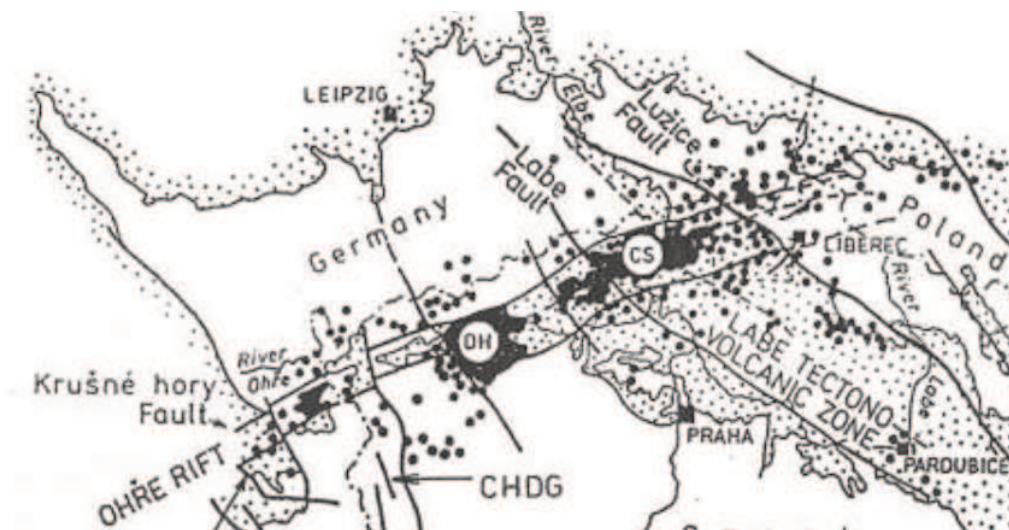
Svrchnokřídové sedimenty jsou v rámci České křídové pánve uloženy obvykle téměř horizontálně. Jsou zastoupeny dvěma litologickými komplexy – *pelitickým* (jíly jílovce, silty, siltovce, slíny, slínovce) a *psamitickým* (pískovce). Tato dvě souvrství se mohou v rámci svrchnokřídových sedimentů i několikrát střídat. Jejich mocnost v oblasti Českého středohoří dosahuje až 900 m (Pašek, Matula 1986).

Psamitický komplex tvoří hlavně jemně až hrubě zrnité pískovce, přičemž převládají středně zrnité. Obvykle jsou žlutošedé až bílošedé barvy s lokálním nádechem rezavých odstínů. Pískovce mají typickou kvádrovitou odlučnost dle primární vodorovné vrstevnatosti a dle dvou systémů obvykle svislých puklin. Horniny jsou obvykle slabě stmeleny a rychle se tak rozpadají na písčité eluvium.

Pelitický komplex zahrnuje obvykle méně zpevněné horniny, které především z období turonu a coniacu mohou být až několik set metrů mocná. Jsou šedé až šedozelené barvy, často slinité až vápnité – slínovce a jílovité vápence. Na svém povrchu jsou nestejnorodé s přechodem do jiných hornin, hlavně prachovitých a písčitých. Na povrchu nejsou nikdy ve zdravém stavu, neboť snadno zvětrávají na jílovité zeminy (Pašek, Matula, 1986).

6.3 Terciérní formace

V raném období paleogénu se na evropské desce začaly projevovat následky alpinských horotvorných procesů, což mělo za následek vytvoření rozsáhlého riftového systému v západní a centrální Evropě. V Českém masivu tak vznikl systém příkopových propadlin a zlomových pásem reprezentovaných především tzv. oherským riftem (Šnellerová, 2011).

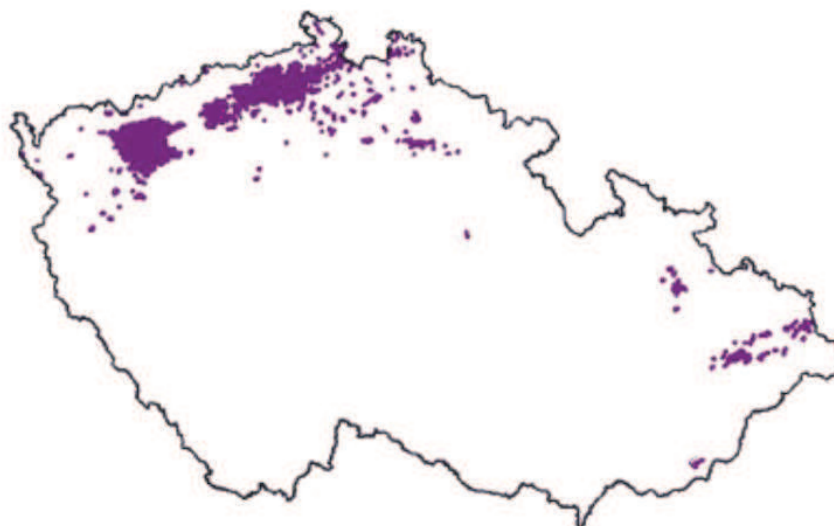


Obrázek 33. Oherský rift (Ohře rift) na území české republiky s vyznačením Českého středohoří (CS) a Doupovských hor (DH) (Kopecký, 1978)

Vznik Oherského riftu se datuje až do období staršího mezozoika. Na severozápadě je ohraničen krušnohorským zlomem a na jihovýchodě litoměřickým zlomem. Probíhá celými severozápadními Čechami od hranic s německým Bavorskem až do Polska – na délku má přibližně 400 km. Na území České republiky dosahuje šířky průměrně 25 km (obrázek 33).

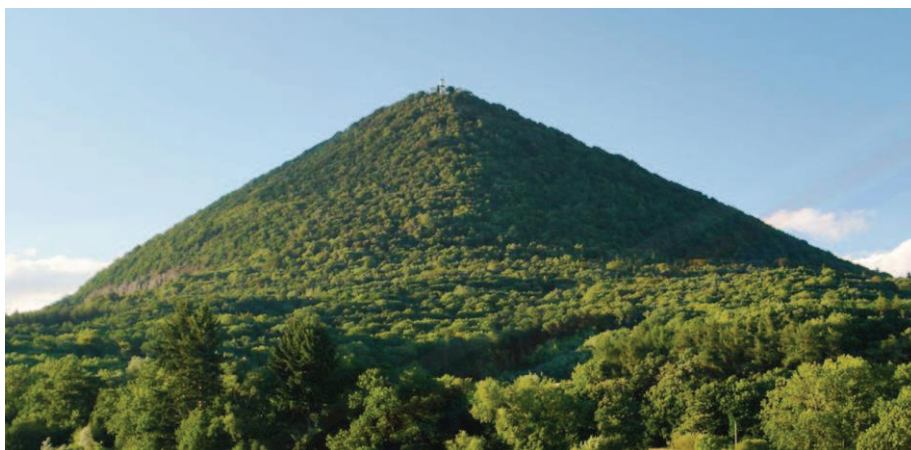
Jedná se o příkopovou propadlinu, která sleduje starou nestabilní zónu. K projevům aktivity této zóny patří také vytvoření podkrušnohorských hnědouhelných pánví a výzdvih Krušných hor (GeoWeb © 1999 - 2017 Pavel Bokr; Chlupáč 2002).

Oblast sesuvu leží v Českém Středohoří, které jsou spolu s Doupovskými horami nejen v rámci Oherského riftu nejvýraznějšími projevy sopečné činnosti na území České republiky (obrázek 34). Jedná se o tzv. neoidní sopečnou činnost – nejmladší sopečná činnost na území ČR, která je spjatá s projevy alpinského vrásnění. Tato vulkanická činnost se na území Českého středohoří projevovala už od období svrchní křídý až do počátku kvartéru, svého vrcholu však dosáhla v epoše eocénu až miocénu spadajícího do období před 54 – 7 miliony let. V období před neoidní vulkanickou činností byl český masiv z tektonického hlediska relativně klidnou oblastí (GeoWeb © 1999 - 2017 Pavel Bokr; Šnellerová, 2011; Chlupáč, 2002).

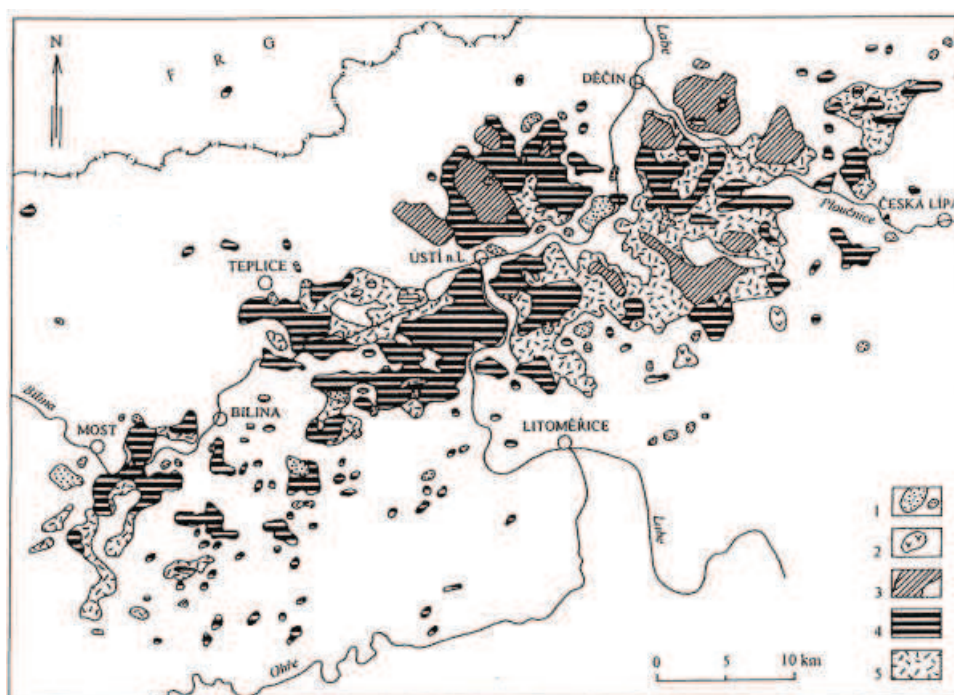


Obrázek 34. Projevy neoidní vulkanické činnosti na území ČR (GeoWeb © 1999-2017 Pavel Bokr)

V oblasti Českého středohoří se projevovaly ve značné míře povrchové vulkanické procesy jako efúze, exploze a intruze, do dnešního dne se však zachovaly obvykle pouze podpovrchová tělesa sopečného původu jako přírodní dráhy vulkánů, lakolity, žíly apod. Navzdory svému dramatickému tvaru je typickým lakolitem například i nejvyšší vrchol Českého středohoří Milešovka (Obrázek 35) (Cajz, et. al., 1999).



Obrázek 35. Milešovka (836,5 m.n.m.)



Obrázek 15 Mapa neovulkanitů v Českém středohoří (Cajz, et. al., 1999)

- 1- trachytové intruze
- 2 - trachybazaltové intruze
- 3 - trachybazaltová pyroklastika a lávy
- 4 - basanitové lávy a intruze
- 5 - bazaltová vulkanoklastika

Společným znakem všech neoidních vulkanitů je jejich alkalický charakter, nebo je tvoří foidy, popř. jejich bazický až ultrabazický charakter. Převládají čedičové horniny jako bazalty, bazanity, nefrity apod. (Chlupáč et. al., 2002).

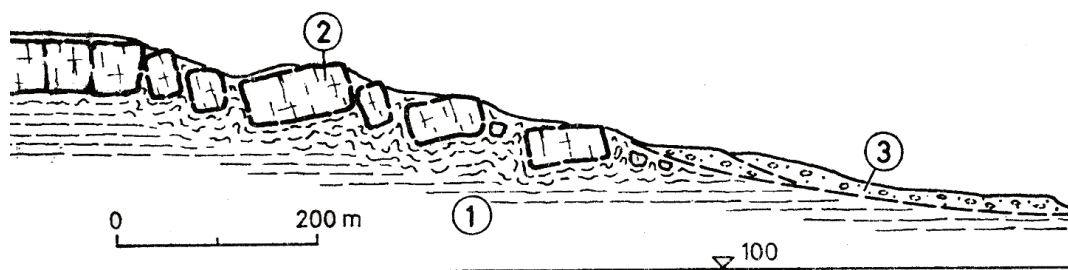
Vedle neovulkanitů je období eocénu až miocénu zastoupeno také staršími jílovitými sedimenty – tufy a tufity, které ovšem v porovnání s neovulkanity nedosahují příliš vysokých mocností. Jejich přítomnost je spojena s tektonickou aktivací oblasti. V závislosti na zrnitosti mohou mít

tufy charakter slabě stmelených zemin až po relativně pevné horniny. Tufity mají charakter nepevněných sedimentů (Chlupáč et. al., 2002).

6.4 Kvartérní formace

Značný vliv na formování a tvorbu kvartérních sedimentů mělo časté střídání klimatu v období kvartéru. Zatímco v období třetihor u nás panovalo až subtropické klima, nastalo pak ochlazení vrcholící během období pleistocénu ve čtyřech hlavních ledových dobách střídajících se s mírnějšími dobami meziledovými. Trvale zaledněné byly na území České republiky, naposledy během Sálského a Elsterského zalednění, sice jen menší oblasti dnešní severní Moravy a Slezska a severních Čech, změna klimatu však měla vliv na celé naše území nacházející se v tzv. periglaciální oblasti. Povrch přestal být chráněn vegetací a horniny byly vystaveny zvětrávání za extrémních klimatických podmínek, denudaci, nebo soliflukci (Pašek, Matula, 1986).

Kvartérní pokryv je v zájmové oblasti tvořen především deluviálními sedimenty, jejichž litologická skladba odpovídá svým charakterem matečným horninám. Jedná se o hlinité až hlinito-kamenité sedimenty pestrých barev i minerálního složení, s častým výskytem bloků neovulkanitů (© Česká geologická služba 2017). Způsob, jakým se tyto bloky odlučují a sesouvají od svého matečního útvaru je zjevný z obrázku 37.

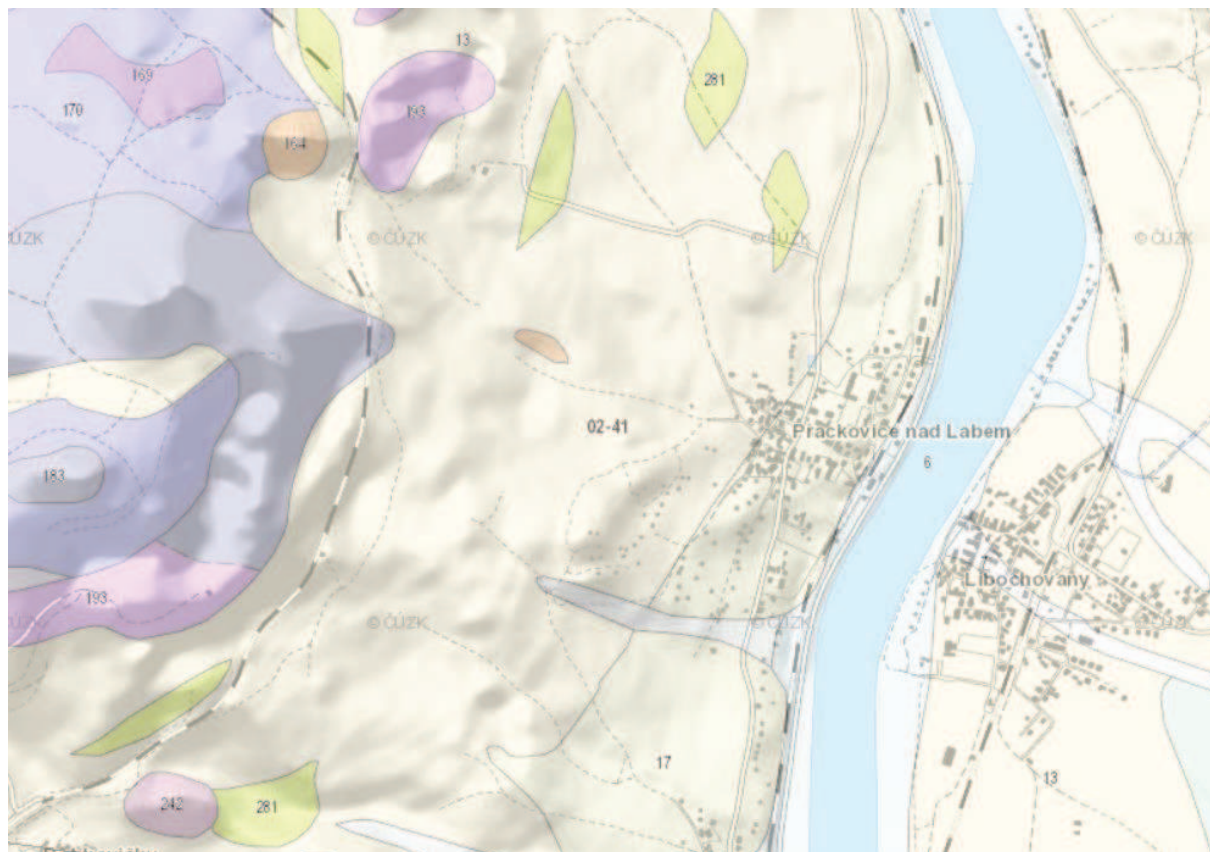


Obrázek 37. Schéma blokového sesuvu (Pašek, Demek, 1966)

- 1 - podložní horniny
- 2 - odloučené bloky
- 3 - deluvium

Celou oblastí Českého středohoří v blízkosti zájmové oblasti protéká řeka Labe (sesuv se nachází asi 1 500 m od toku). Řeka ovšem protéká mezi relativně strmými svahy, a fluvialní sedimenty hlinitého až štěrkovitého charakteru jsou tak v oblasti přítomny obvykle v pásu širokém 300 – 400 m, ze kterého ojediněle vybíhají úzká záplavová ramena (viz obrázek 37) (© Česká geologická služba 2007). Od období eocénu stačila řeka Labe napříč Českým středohořím vyhloubit kaňon, který zasahuje až ke křídovým formacím. Dle Vladimíra

Cajze v určitých oblastech už stačilo Labe odnést až 400 výškových metrů materiálu a sesuvy, které v údolí Labe v Českém středohoří pravidelně probíhají, jsou toho přirozenou součástí (© Česká televize 1996 – 2017).



Obrázek 38. Geologická mapa kvartérního pokryvu 1:15 000 ((© Česká geologická služba 2017)

Fialová, žlutá, oranžová – třetihorní neovulkanity

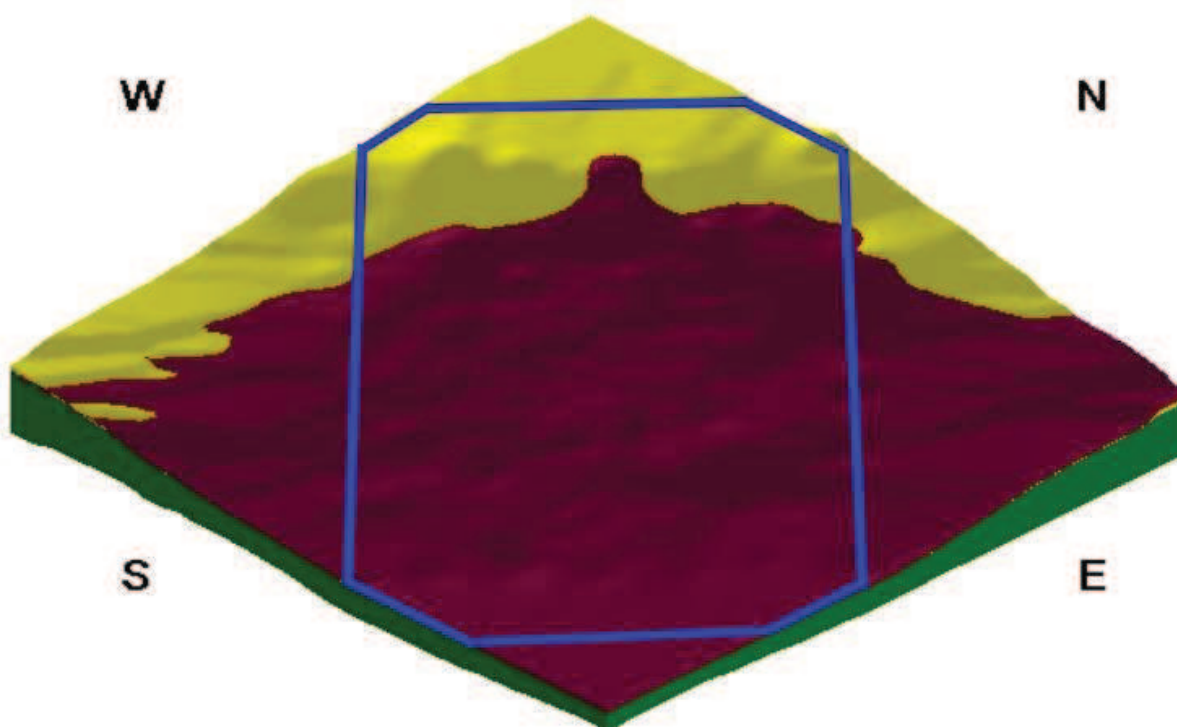
Světle hnědá – kvartérní deluviální sedimenty

Modrá –kvartérní fluviální sedimenty

7. Tvorba inženýrskogeologického modelu

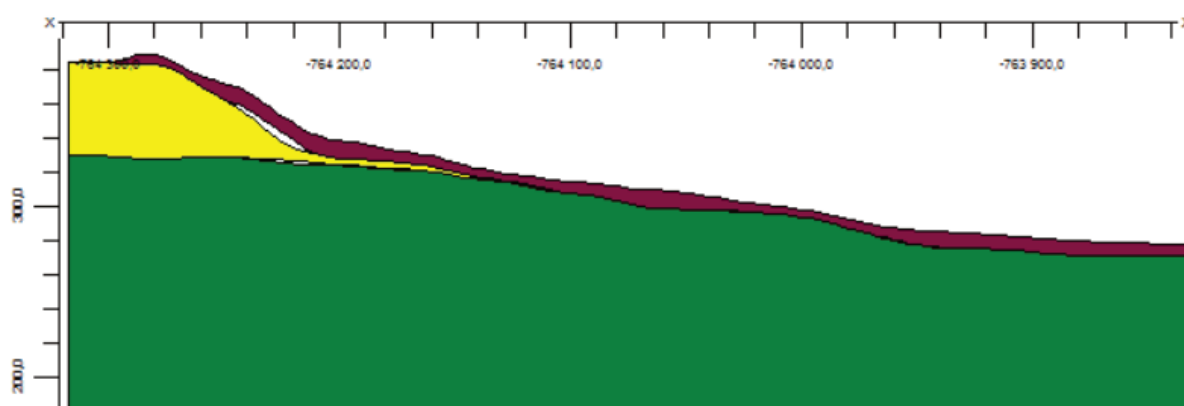
Pro začátek modelování byl vytvořen **stratigrafický model** zájmové oblasti. Stratigrafické modelování není primárním cílem této práce, tento model však byl vytvořen za účelem snadnější orientace mezi jednotlivými vrstvami z hlediska jejich stáří, jak je popsáno v kapitole 6.

Na obrázku 39 je stratigrafický model zájmové oblasti. Ta je ještě dodatečně vyznačena modře, jelikož ve stratigrafickém modelování nebyl použit žádný filtr vzdálenosti – jihozápadní a severovýchodní oblasti modelu nevycházejí z žádných relevantních dat a jejich využití je tak značně zavádějící. Model poskytuje názornější informace o celkové situaci v dané oblasti. Stratigrafické modely jsou vytvářeny pomocí spojitých ploch, které poskytují přesnější představu o reliéfu povrchu zájmové oblasti tak, jak ji vytvořil RockWorks. Vytvořená stratigrafická rozhraní jsou následně případně použitelná v litologickém modelování.



Obrázek 39. Stratigrafický model zájmové oblasti (vyznačeno modře) pohled od jihovýchodu (nástroje: RockWorks)
Zelená – křída
Žlutá – neogén
Fialová - kvartér

Na obrázku 40 je vyobrazen řez středem zájmové oblasti. Je vidět, že neogenní uloženiny, tj. jílové tufy a bazaltové neovulkanity, se nacházejí pouze na severozápadě modelované oblasti (vrch Kubačka a nepojmenovaný vrch jižně od něj). Důležitá informace je sklonitost terénu, která je využita v litologickém modelování – mimo neovulkanity jsou vrstvy uloženy zhruba pod úhlem 7 stupňů směrem na jihovýchod. Na tomto řezu je vidět nevýhoda tohoto způsobu stratigrafického modelování – tím že jsou vrstvy modelovány každá zvlášť, mohou mezi nimi být mezery. Ovšem vzhledem k tomu, že je tento model pouze orientační, to v dalším modelování není problém.



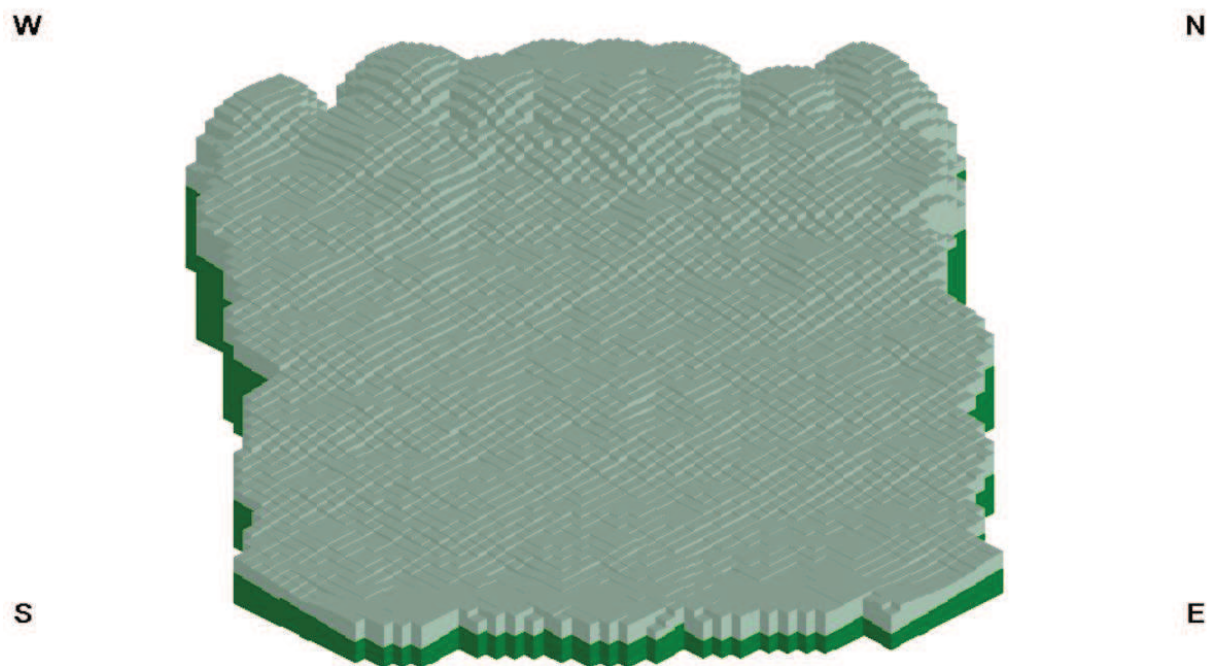
Obrázek 40. Stratigrafický řez středem zájmové oblasti od severozápadu k jihovýchodu (nástroje: RockWorks)

Zelená – křída

Žlutá – neogén

Fialová - kvartér

Litologický model vycházel vedle litologických dat z jednotlivých vrtů také z údajů, které poskytl stratigrafický model. Nejprve jsou zobrazeny a popsány komplexní 3D litologické modely. Poté modely povrchu terénu, a nakonec jsou tyto modely spojeny v litologických řezech.



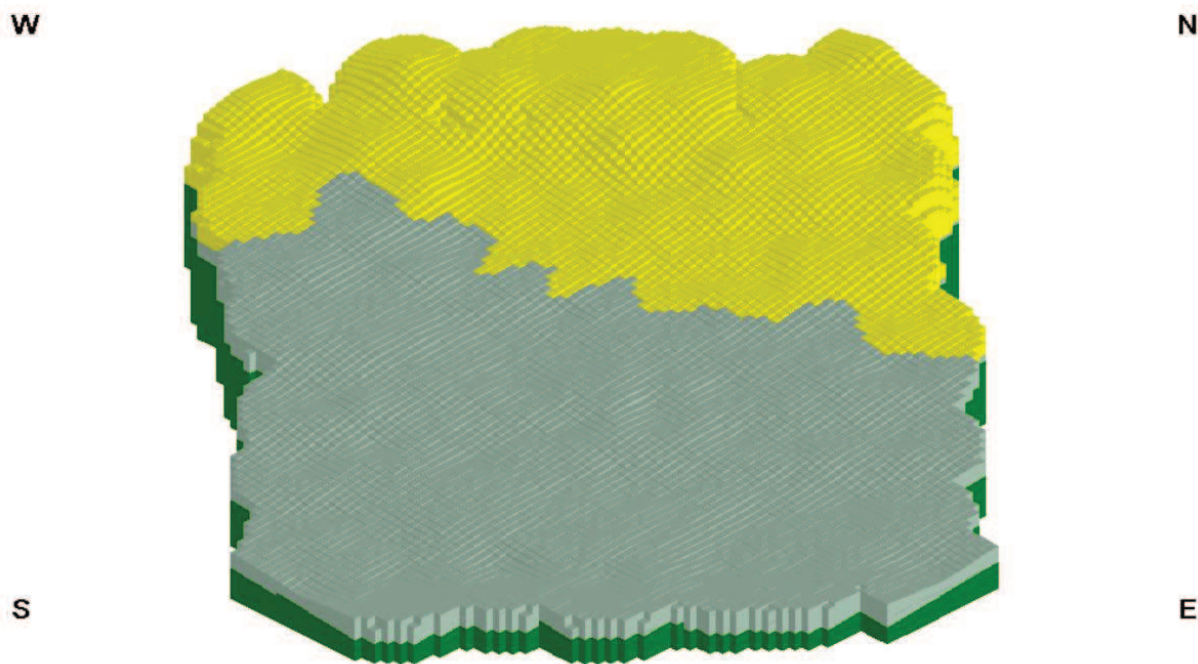
Obrázek 41. 3D litologický model vrstev o G hodnotách 6-7 (nástroje: RockWorks)

Pohled od jihovýchodu

Zelená – Slínovec

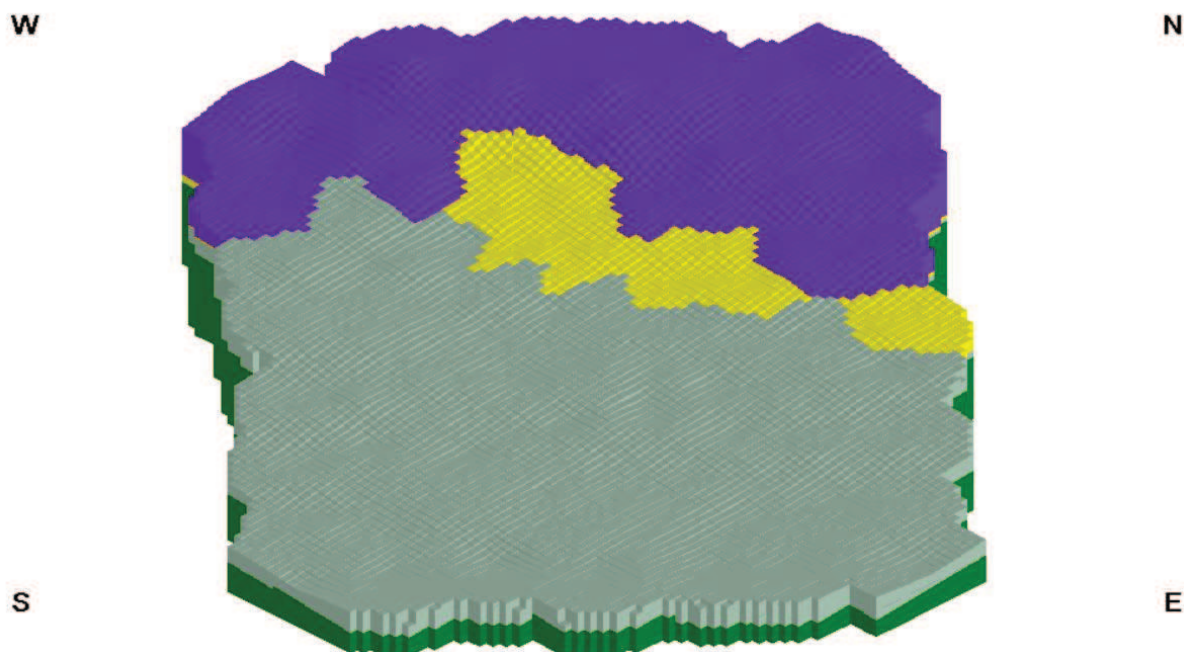
Světle zelená – zvětralý slínovec

Na obrázku 41 jsou vyobrazeny křídové litologické vrstvy. Slínovec tvoří podloží celé zájmové oblasti. Zvětralý slínovec dosahující průměrně mocnosti 2 – 7 metrů se nachází také v celé zájmové oblasti. Dosahuje sklonu 7 stupňů s tím, že směrem na severozápad se snižuje.



Obrázek 42. 3D litologický model vrstev o G hodnotách 5-7 (nástroje: RockWorks)
 Pohled od jihovýchodu
 Zelená – slínovec
 Světle zelená – zvětralý slínovec
 Žlutá – tuf

Obrázek 42 zobrazuje rozložení neogenních tufů v zájmové oblasti. Nachází se především na severozápadě a severu zájmové oblasti. Dosahují maximální mocnosti až téměř 20 metrů. Směrem na jihozápad vyklíňují. Sklon povrchu tufů je proměnlivý od vodorovného až po 5 – 7 stupňů. V téměř celém svém výskytu se nachází pod bazalty (viz dále).



Obrázek 43. 3D litologický model vrstev o G hodnotách 4-7 (nástroje: RockWorks)

Pohled od jihovýchodu

Zelená – slínovec

Světle zelená – zvětralý slínovec

Žlutá – tuf

Fialová – bazalt

Obrázek 43 zobrazuje rozložení neovulkanitů – bazaltů v zájmové oblasti. Bazalty tvoří vrch Kubačka a nepojmenovaný vrch na jihozápad od něj. Bazalty mohou dosahovat mocnosti až 55 metrů. Jejich svahy jsou už většinou značně zvětralé (způsob zvětrávání bazaltů – viz kapitola 6) a dosahují sklonu obvykle okolo 15 stupňů. Ve středu zájmové oblasti, kde došlo k sesuvu, se však nachází proláklina o sklonu bazaltů až 35 stupňů.



Obrázek 16. 3D litologický model vrstev o G hodnotách 3-7 (nástroje: RockWorks)

Pohled od jihovýchodu

Zelená – slínovec

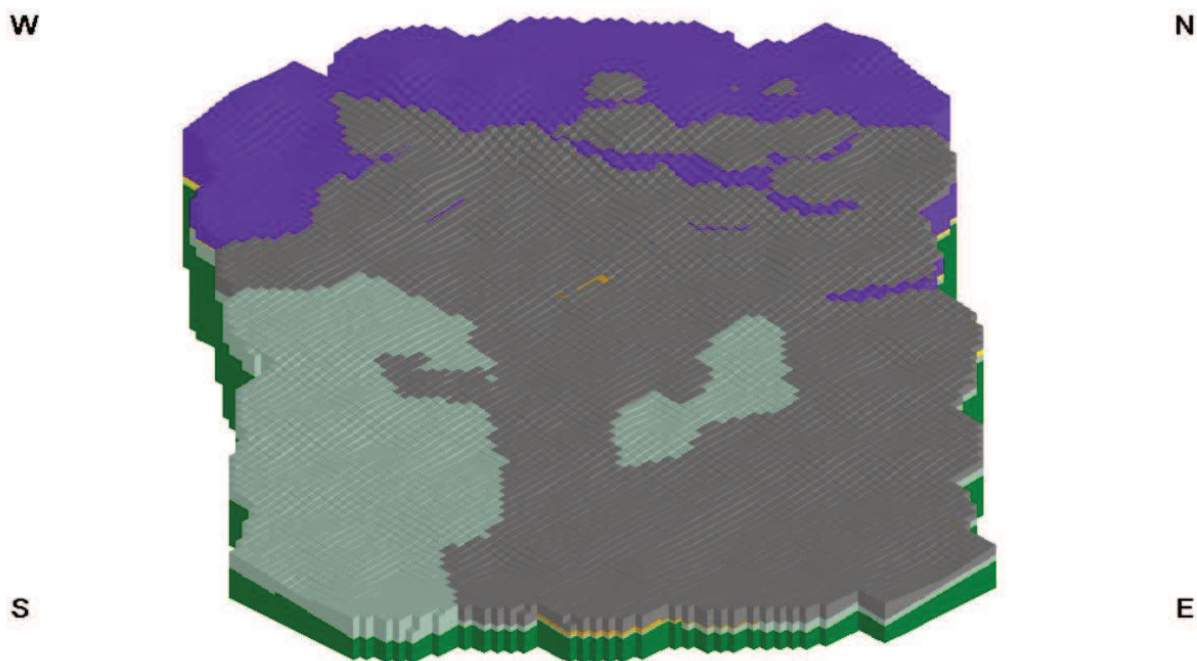
Světle zelená – zvětralý slínovec

Žlutá – tuf

Fialová – bazalt

Tmavě oranžová – jemnozrnné diluvium spodní

Obrázek 44 zobrazuje rozložení spodní vrstvy jemnozrnného deluvia. Vyskytuje se v nepravidelném pásu širokém cca 100 metrů nacházející se zhruba uprostřed zájmové oblasti. Jeho mocnosti nepřesahuje 3 metry a je uloženo ve sklonu 7 stupňů.



Obrázek 17. 3D litologický model vrstev o G hodnotách 2-7 (nástroje: RockWorks)

Pohled od jihovýchodu

Zelená – slínovec

Světle zelená – zvětralý slínovec

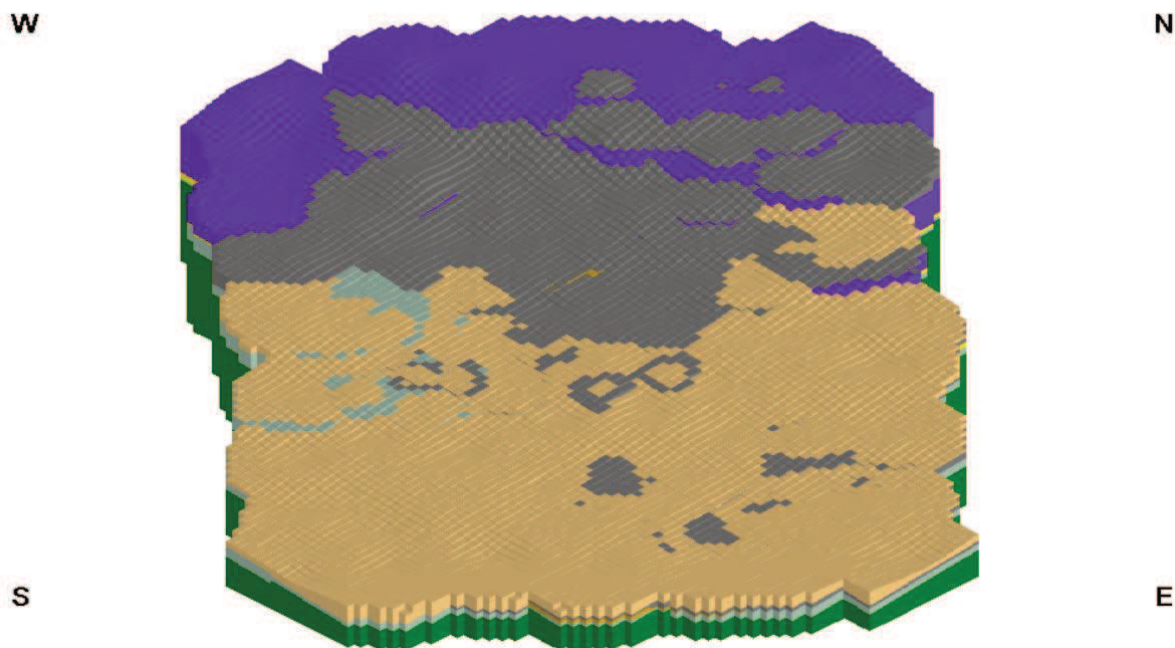
Žlutá – tuf

Fialová – bazalt

Tmavě oranžová – jemnozrnné diluvium spodní

Šedá – hrubozrnné diluvium

Obrázek 45 zobrazuje rozložení hrubozrnného deluvia. Krom oblasti na jihu a svahů neovulkanitů se s lokálními vyklíněními nachází v celé zájmové oblasti. Jeho mocnost je obvykle do 3 metrů a je uloženo pod úhlem 7 stupňů. Tato vrstva však vznikla zvětráváním neovulkanitů a pod samotnými svahy může být lokálně nahromaděna až do mocností přesahující 20 metrů.



Obrázek 18. 3D litologický model vrstev o G hodnotách 1-7 (nástroje: RockWorks)

Pohled od jihovýchodu

Zelená – slínovec

Světle zelená – zvětralý slínovec

Žlutá – tuf

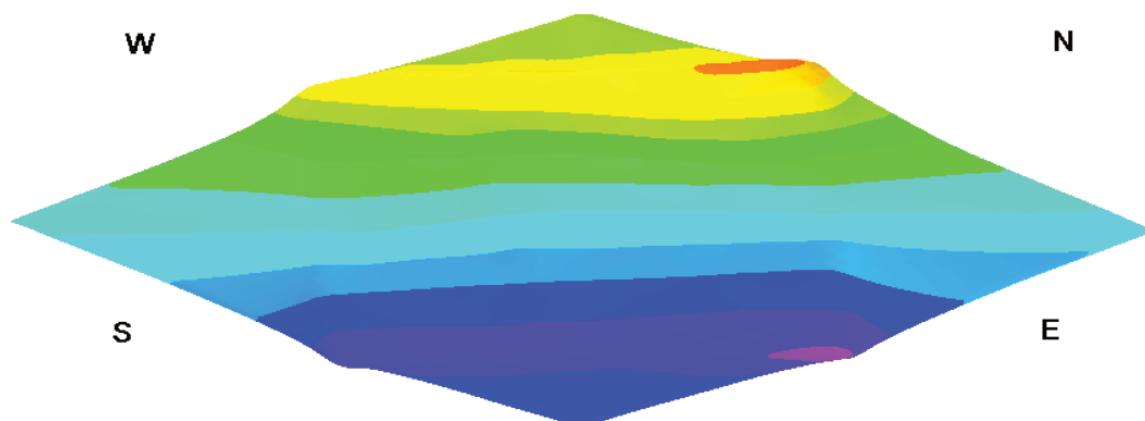
Fialová – bazalt

Tmavě oranžová – jemnozrnné diluvium spodní

Šedá – Hrubozrnné diluvium

Světle oranžová – jemnozrnné diluvium svrchní

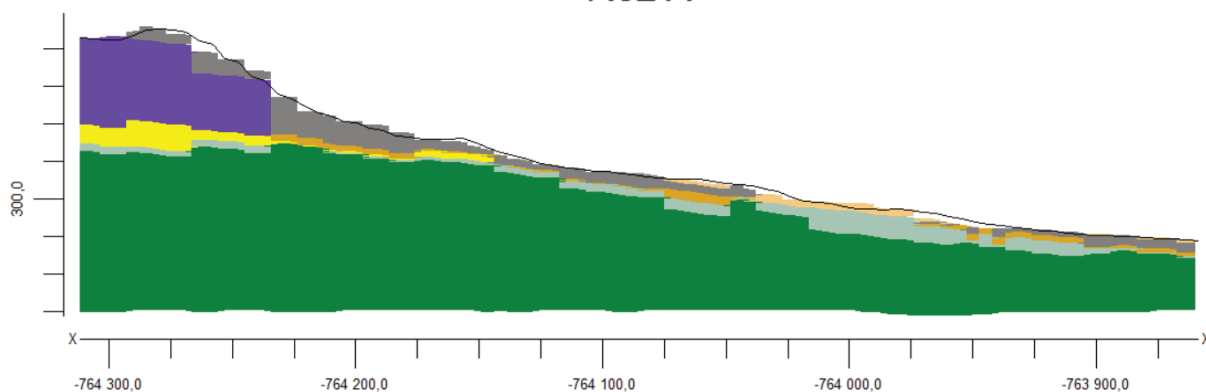
Obrázek 46 zobrazuje rozložení svrchní vrstvy jemnozrnného deluvia v zájmové oblasti. Současně se jedná o kompletní litologický 3D model. Tato vrstva se nachází v jihovýchodní polovině zájmové oblasti mimo strmější svahy neovulkanitů. Jeho mocnost nepřesahuje 5,5 metrů a je uloženo pod úhlem 7 stupňů. Na tomto obrázku je také zjevné, které vrstvy vystupují na povrch. Na jihovýchodě je to především svrchní jemnozrnné deluvium, pod svahy vrchu Kubačka hrubozrnné deluvium a na samotném vrchu na povrch vystupují bazalty. V západní části zájmové oblasti vystupuje lokálně na povrch také zvětralý slínovec.



Obrázek 19. GTN model reliéfu zájmové oblasti převedený do RockWorks. (nástroje: RockWorks)
 Oranžová - nejvyšší nadmořská výška
 Modrá - nejnižší nadmořská výška
 Pohled od jihovýchodu

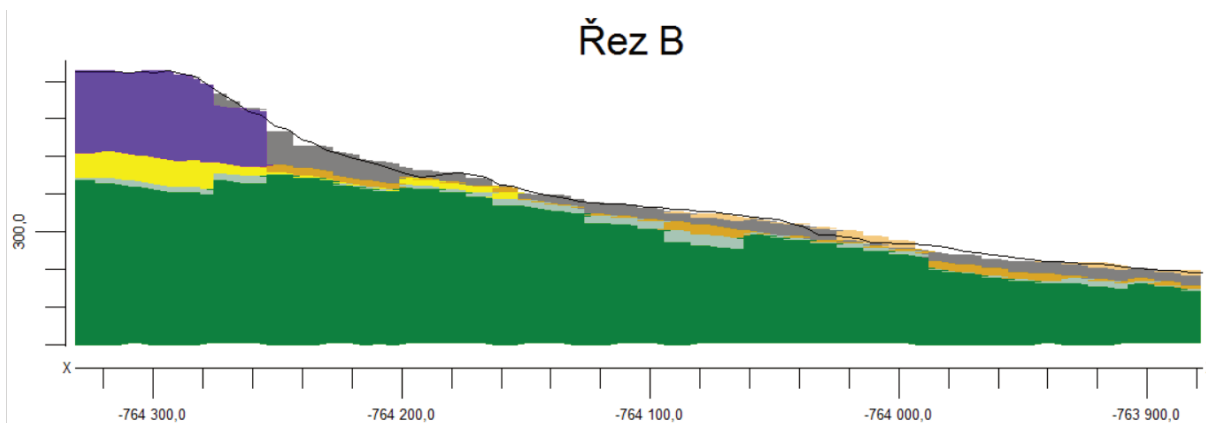
Obrázek 47 zobrazuje povrch zájmové oblasti, který byl vymodelován z 1x1 m sítě bodů. Fialová linie přibližně reprezentuje odřez dálnice D8. Zelená odpovídá svahům vrchu Kubačka a rovinný prostor nad ním je přilehlý kamenolom.

Řez A



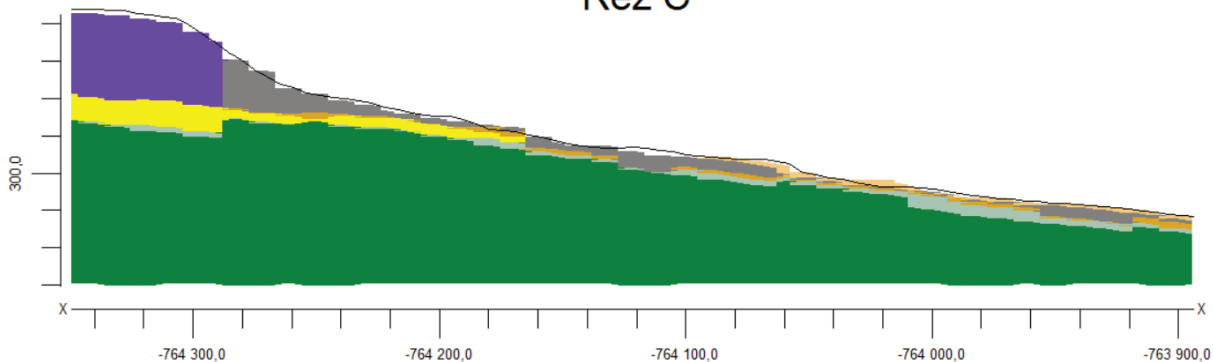
Obrázek 48. (nástroje: RockWorks)

Řez B



Obrázek 20 (nástroje: RockWorks)

Řez C



Obrázek 49. (nástroje: RockWorks)

Litologické řezy jsou orientovány stejně jako stratigrafické

Zelená – slínovec

Světle zelená – zvětralý slínovec

Žlutá – tuf

Fialová – bazalt

Tmavě oranžová – jemnozrnné diluvium spodní

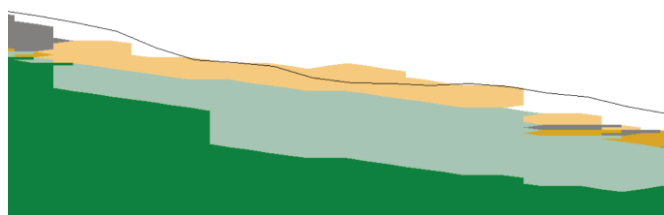
Šedá – hrubozrnné diluvium

Světle oranžová – jemnozrnné diluvium svrchní

Černá čára – skutečný povrch terénu

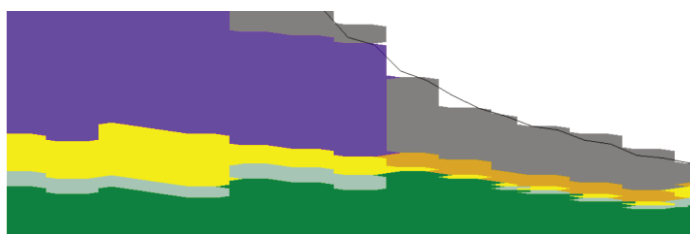
Na obrázcích 48 až 49 jsou vyobrazeny litologické řezy dle RockWorks, které byly vytvořeny dle zadaných souřadnic (viz kapitola 2).

Dle čáry znázorňující skutečný povrch terénu je vidět, že RockWorks byl schopen vymodelovat povrch terénu, který téměř odpovídá skutečnosti, a to jen dle nadmořských výšek zadaných vrtů. Bez zobrazení skutečného terénu by to nebylo patrné, ale je vidět, že RockWorks do jisté míry v modelování zohlednil i odřez dálnice D8.



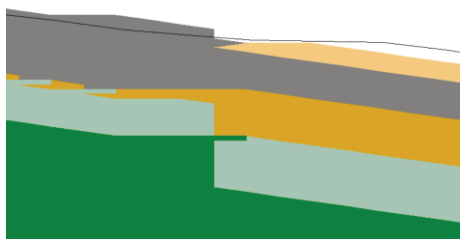
Obrázek 50. Detail odřezu dálnice D8 v řezu A (nástroje: RockWorks)

Hlavní nepřesnost litologického modelování spočívá v některých oblastech v nepřesném sklonu uložení litologických vrstev. Jedná se o oblasti výskytu bazaltů a v menší míře i v jihovýchodní části modelované oblasti. Do modelu byl definován jednotný sklon 7 stupňů směrem na jihovýchod, což však v těchto místech neodpovídá skutečnosti – sklon zde ve skutečnosti je minimální.



Obrázek 51. Detail nepřesného sklonu vrstev pod bazalty v řezu A (nástroje: RockWorks)

Další nepřesností v litologickém modelu je návaznost jednotlivých vrstev. To je způsobeno nízkou mocností kvarterních vrstev vzhledem k velikosti modelované oblasti. Pro eliminaci tohoto problému by bylo nutné podstatně zmenšit velikost modelovaných buněk, což vzhledem k hardwarovým možnostem nebylo možné.

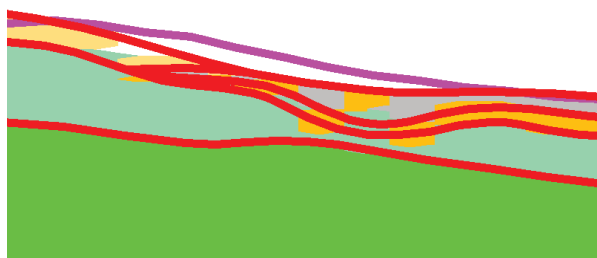


Obrázek 52. Detail nenávaznosti vrstev v řezu A (nástroje: RockWorks)

8. Vliv transformace inženýrskogeologického modelu do geotechnického výpočetního modelu a jeho vytváření

Při transformaci do geotechnického modelu byly využity následující postupy a byly řešeny následující problémy, z nichž některé byly zmíněny v kapitole 7:

- **Nepřesně vymodelovaný povrch terénu** – jak bylo zmíněno v předešlé kapitole, RockWorks byl schopen v tomto případě povrch vymodelovat na naprosté většině míst vzhledem ke způsobu litologického modelování s vysokou přesností, v této oblasti proto nebyly úpravy příliš velkého rozsahu. Pokud se vymodelovaný povrch se skutečným povrchem ve větší míře neshodovaly, nadmořská výška vymodelovaného terénu nebyla upravena dle skutečnosti, byl brán pouze ohled na reliéf, aby celistvost modelu z RockWorks zůstala zachována. Pokud by měla být měněna nadmořská výška terénu, nemohla by se tato změna dotknout pouze nejsvrchnější litologické vrstvy, ale také všech ostatních v daném místě. To by vedlo k vysokým nepřesnostem, nehledě na to, že by tímto postupem byl potlačen zkoumaný vliv transformace mezi jednotlivými typy modelů.



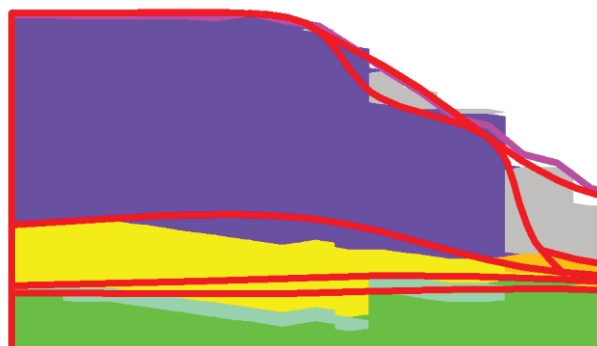
Obrázek 53. Příklad dílčí nepřesnosti v modelování povrchu terénu v řezu A (nástroje: RockWorks, AUTOCAD)

Legenda litologie viz výše

Červená – rozhraní dle RockWorks

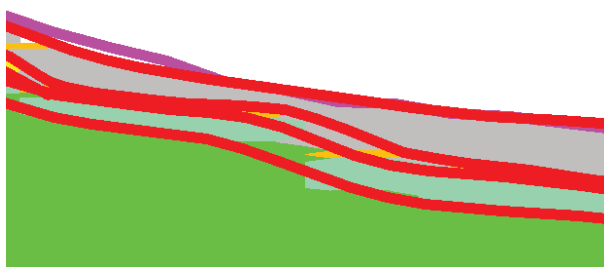
Fialová – skutečný povrch terénu

- **Nepřesná sklonitost litologických vrstev** – výše bylo zmíněno, že na určitých místech zájmové oblasti modelovaný sklon vrstev neodpovídá skutečnosti. I když je v těchto místech sklon vymodelován chybně, mocnosti vrstev jsou správně. To v kombinaci s body, jejichž poloha se uvažovala jako správná, umožnilo relativně přesnou úpravu modelu.



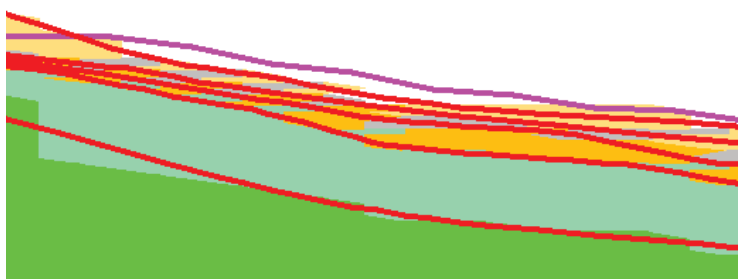
Obrázek 54. Příklad nápravy nepřesného sklonu vrstev v řezu B (nástroje: RockWorks, AUTOCAD)

- **Nenávaznost vrstev** – V zájmové oblasti nebyla zjištěna terasovitost litologických vrstev ani žádné závažnější tektonické poruchy a předpokládá se tedy relativně přesná návaznost všech litologických vrstev. Nespojitosti modelech dle RockWorks jsou způsobeny drobnými odchylkami skutečného sklonu uložení vrstev od definovaného sklonu 7 stupňů. Vrstvy byly spojeny tak, aby jejich uložení co nejvíce odpovídalo realitě, ale aby byl také respektován model RockWorks.



Obrázek 55. Příklad nápravy nespojitosti litologických vrstev v řezu A (nástroje: RockWorks, AUTOCAD)

- **Metoda litologického modelování RockWorks** – Jak již bylo zmíněno, při litologickém modelování nevytváří RockWorks spojité plochy, resp. křivky, ale pracuje s buňkami. Vytvoření spojitých ploch a křivek je však pro stabilitní modelování klíčové a bylo tak nutno učinit ručně. U litologických vrstev s významnější mocností jako bazalt nebo slínovec postačilo se při vytváření křivek držet středů svislých, popř. v některých případech i vodorovných linií reprezentujících litologická rozhraní. U vrstev s nižší mocností, především těch kvartérních, se vycházelo z už vytvořených litologických rozhraní a z namodelovaných mocností.



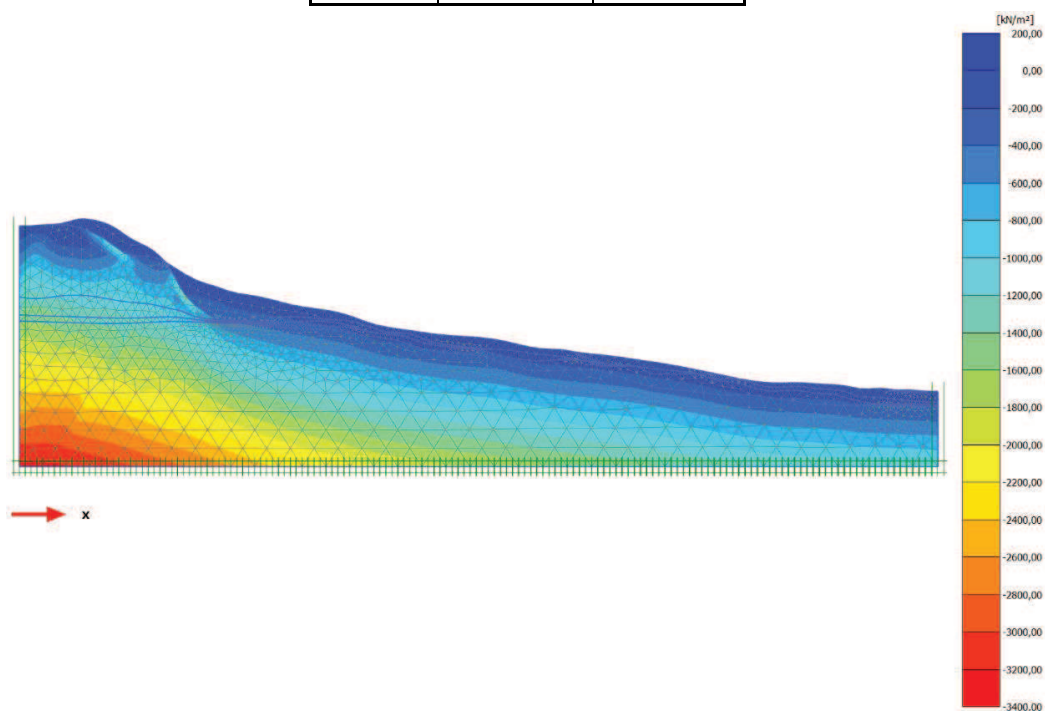
Obrázek 56. Příklad vytváření křivek litologických rozhraní v místě nespojitosti litologických vrstev v řezu C (nástroje: RockWorks, AUTOCAD)

9. Zhodnocení stability zájmové oblasti

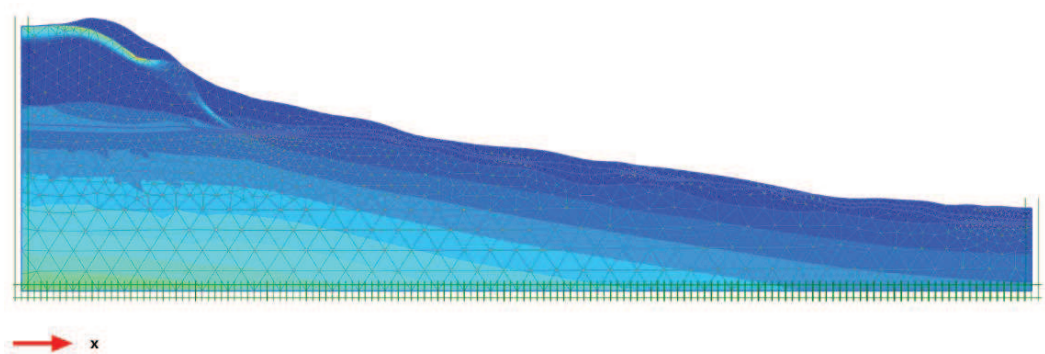
9.1 Vyhodnocení napět'o-deformačního stavu

V iniciační fázi jsou hodnoty totálního napětí v místě vybudování budoucího odřezu (ve výšce západního pruhu – směr Praha) v patě svahu následující:

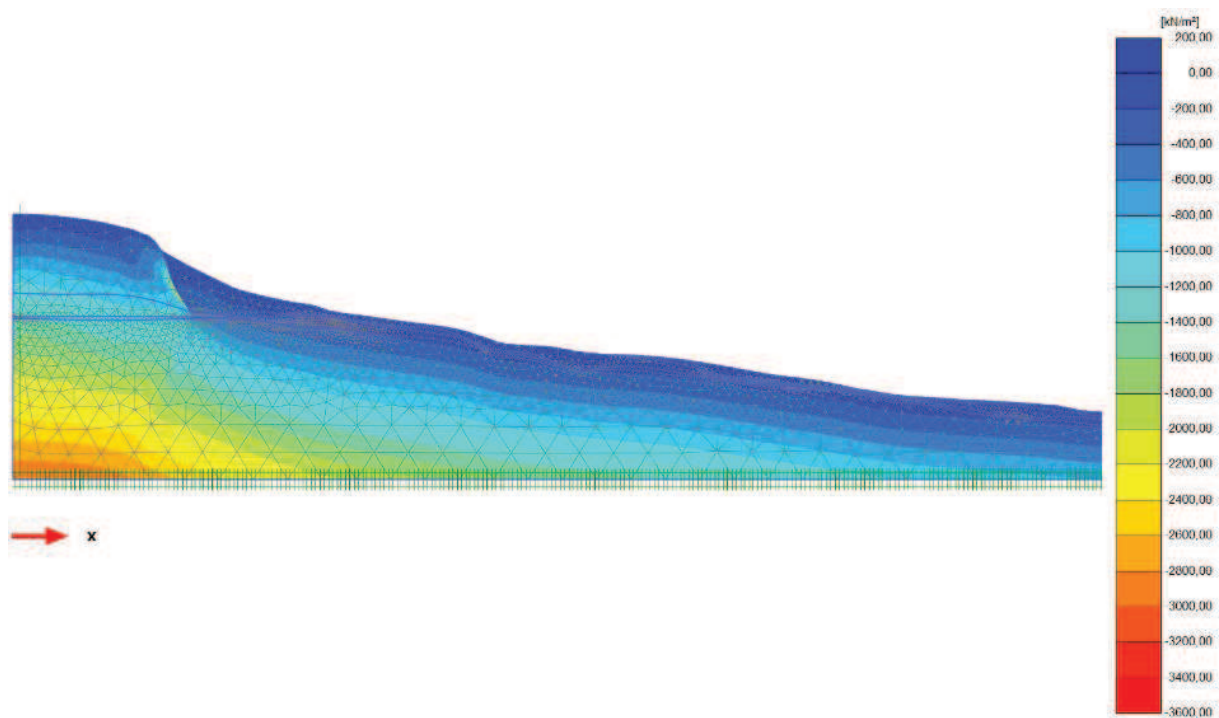
Řez	σ'_{yy} (kPa)	σ'_{xx} (kPa)
A	-85,86	-88,96
C	-162,5	-96,66



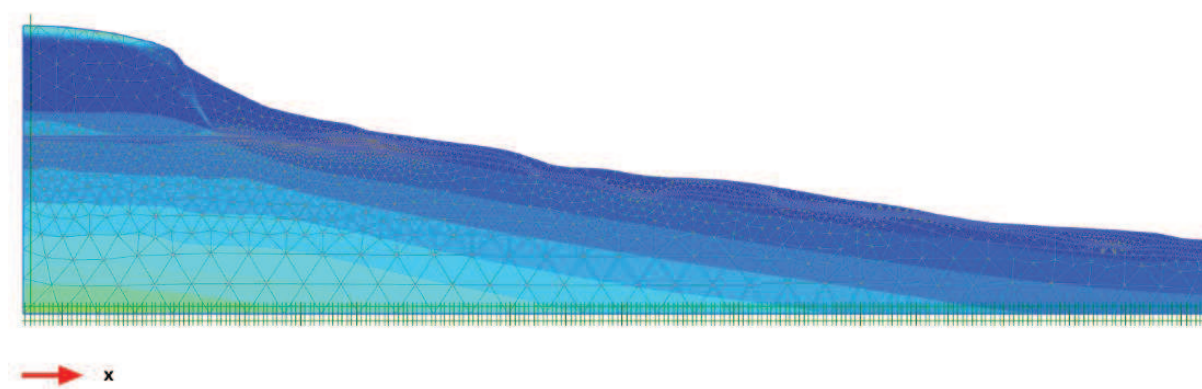
Obrázek 57. Totální svislé napětí v iniciační fázi v řezu A (Nástroje: PLAXIS 2D)



Obrázek 21. Totální vodorovné napětí v iniciační fázi v řezu A (Nástroje: PLAXIS 2D)



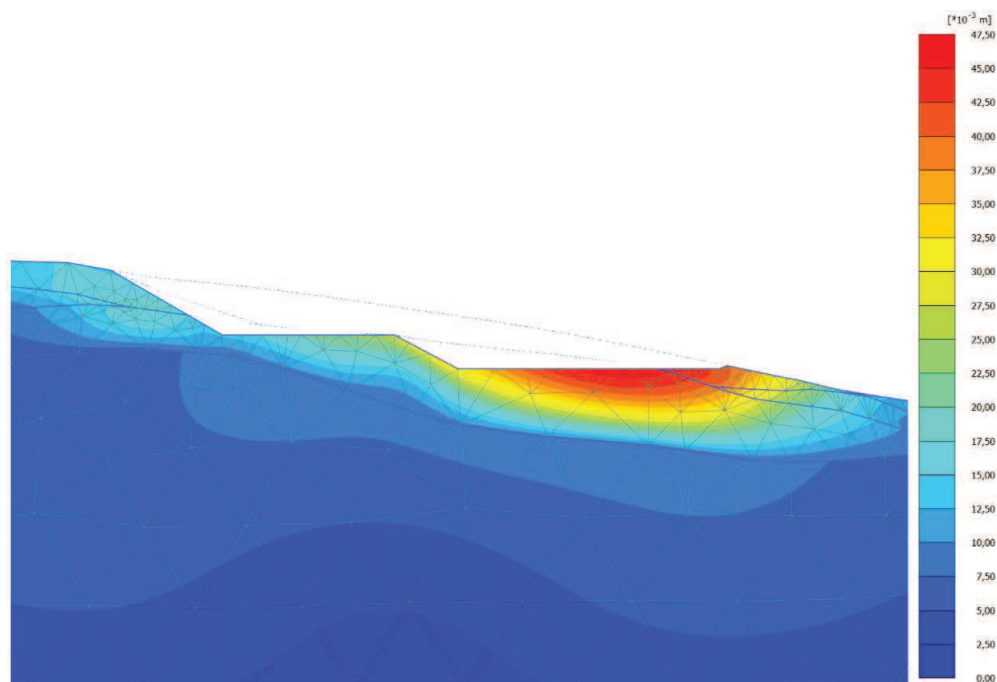
Obrázek 59. Svislá totální napětí v iniciační fázi v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)



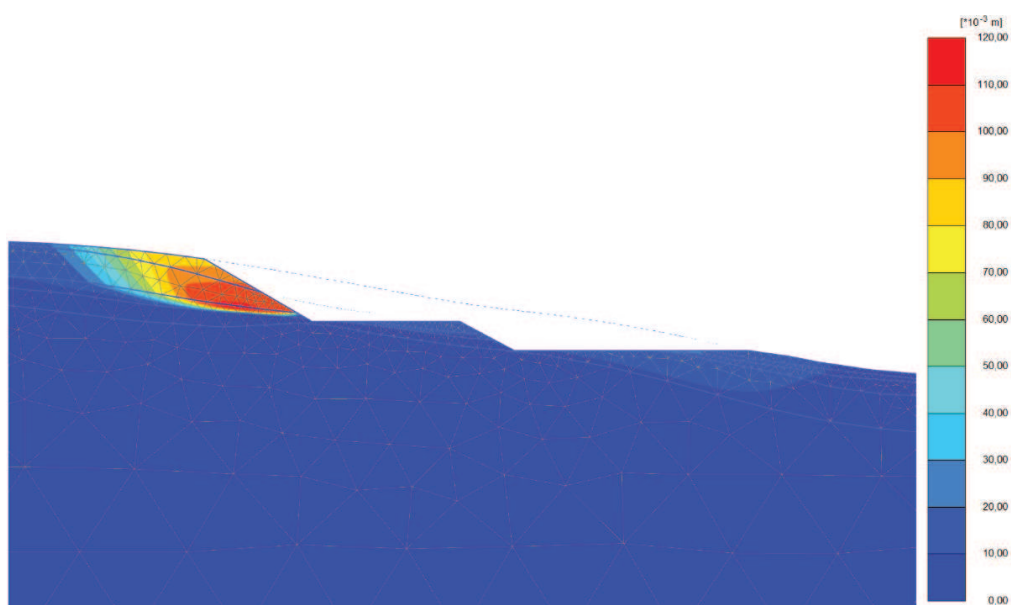
Obrázek 22. Vodorovná totální napětí v iniciační fázi v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)

Po vybudování odřezu (Fáze 1) došlo k záporným deformacím a zdvihu dna odřezu v důsledku pórových tlaků. Zdvihy dna jsou následující:

Řez	u_{tot} (m)
A	0,046
C	0,013



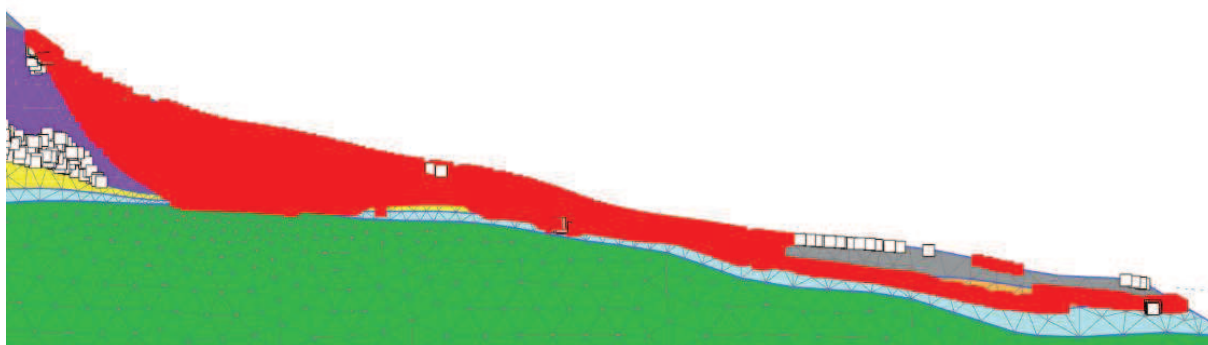
Obrázek 61. Deformace dna odřezu v řezu A (Nástroje: PLAXIS 2D)



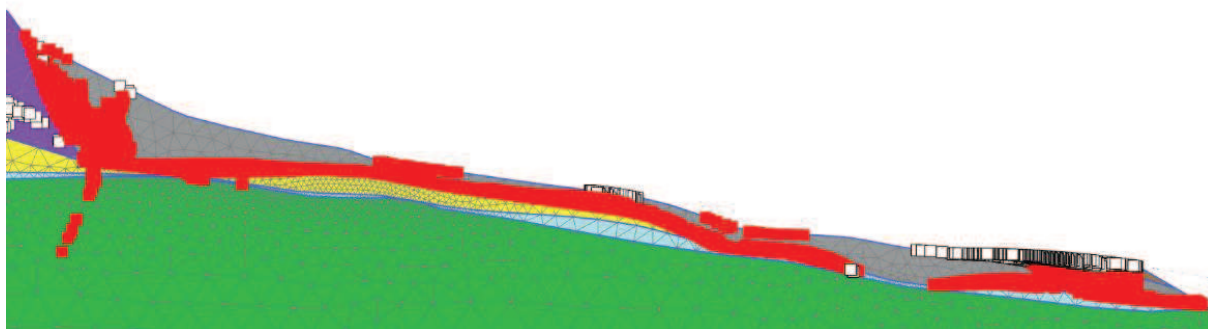
Obrázek 23. Deformace dna odřezu v řezu C (pozn. v důsledku nestability svahu odřezu u řezu C nejsou zdvihy dna tak dobře viditelné, jeho hodnoty jsou však podobné jako v řezu A) (Nástroje: PLAXIS 2D)

9.2 Vyhodnocení plastických oblastí

Obrázky níže se soustředí primárně na oblast mezi lomem na vrchu Kubačka a odřezem dálnice D8, kde sesuv proběhl. U obou řezů platí, že dochází k plastické deformaci prakticky celé vrstvy spodního jemnozrnného deluvia s lokálními zplastizovanými oblastmi v hrubozrnném deluviu, především pod svahy neovulkanitů (červené body). Jak je vidět na obrázku 63, v řezu A je zplastizované také téměř celé hrubozrnné deluvium. Na povrchu svahu lokálně vzniká také tahové namáhání (bílé body), což může vyústit ve vznik trhlin. Plastické body (červené) představují body ležící na Mohrově obálce.



Obrázek 63. Plastické body v řezu A (Nástroje: PLAXIS 2D)



Obrázek 64. Platické body v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)

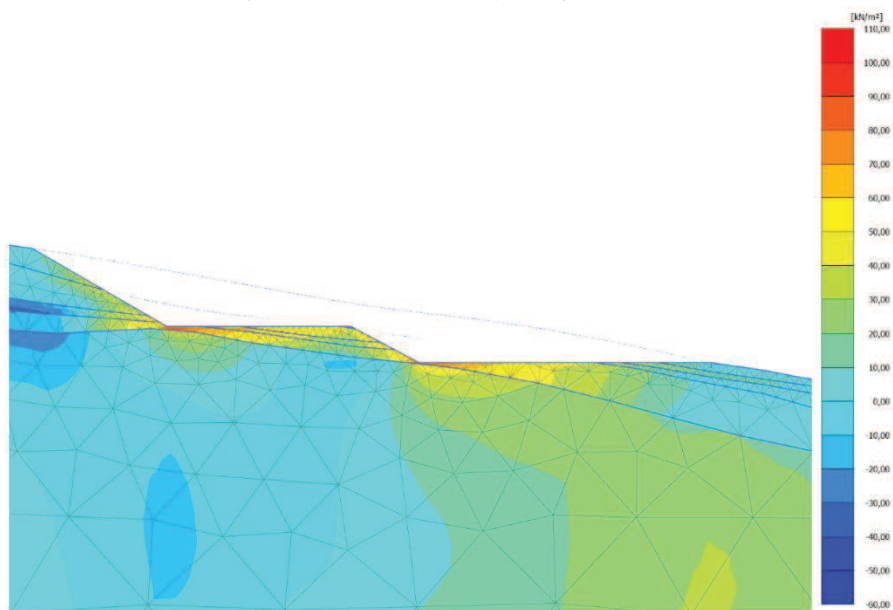
9.3 Vyhodnocení pórových tlaků

Těsně po vyhloubení odřezu dochází na jeho dně k záporným pórovým tlakům, což odpovídá zdvihu dna, jak bylo popsáno výše. Maximální hodnoty pórových tlaků v odřezu v patě svahu jsou následující:

Řez	P_{excess} (kPa)
A	103
C	107,1



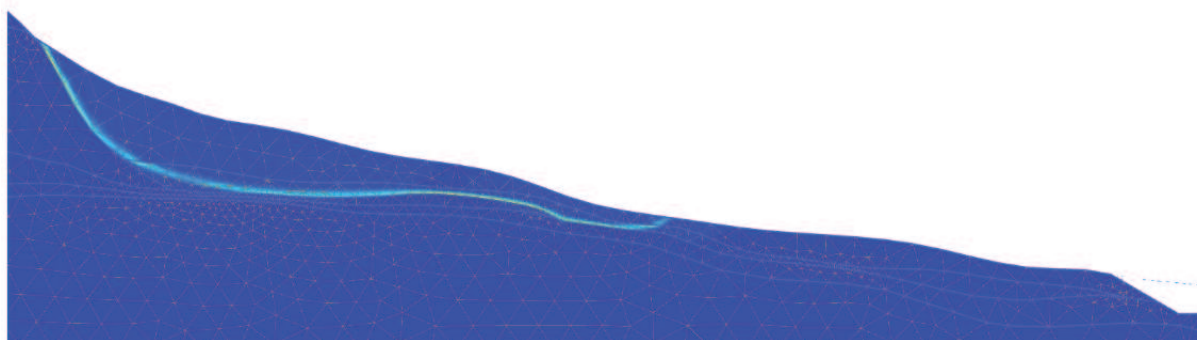
Obrázek 65. Pórové tlaky na dně odřezu v řezu A (Nástroje: PLAXIS 2D)



Obrázek 24. Pórové tlaky na dně odřezu v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)

9.4 Stabilitní posouzení

V řezu A vznikají významná smyková napětí především na západní polovině svahu pod vrchem Kubačka (viz obrázek 67). Smyková plocha se vytváří ve vrstvě spodního jemnozrnného deluvia, pod svahy vrchu Kubačka prochází hrubozrnným deluviem podél rozhraní s bazalty. Smyková plocha je ukončena v místě, kde je vrstva spodního jemnozrnného deluvia přerušena. Dále v místech opětovného výskytu se už tak významná smyková napětí nevytváří. To je způsobeno pravděpodobně tím, že odřez dálnice D8 vrstvu spodního jemnozrnného deluvia v tomto případě nenarušuje.

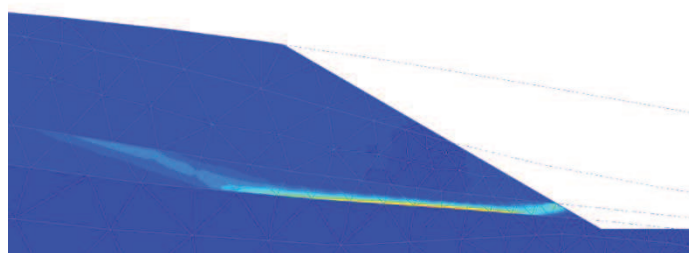


Obrázek 67. Vyobrazení smykové plochy v řezu A (nástroje: Plaxis 2D)

V řezu C naopak vznikají významná smyková napětí v místě odřezu dálnice (viz obrázek 68 a 69). To je způsobeno tím, že v tomto případě odřez dálnice D8 v tomto místě narušuje všechny kvartérní litologické vrstvy.



Obrázek 68. Vyobrazení smykové plochy v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)



Obrázek 69.. Detail smykové plochy v řezu C (Nástroje: PLAXIS 2D)

V jednotlivých řezech tedy bylo dosaženo rozdílných výsledků v otázce tvorby smykových ploch, což je způsobeno jejich rozdílnou geometrií. V řezu A je vrstva spodního jemnozrnného deluvia více rozmanitá a zářezem nenarušená, pod svahy vrchu Kubačka se však v jejím nadloží nachází významné mocnosti hrubozrnných deluvií, což ve výsledku mohlo vést k nestabilitě svahu. V řezu C je naopak spodní vrstva jemnozrnného deluvia narušena a nestabilitou je tak ohrožen samotný svah odřezu. Je velmi pravděpodobné, že v jiných místech svahu mohou tyto faktory působit společně, což mohlo vést k celkové nestabilitě svahu nad odřezem dálnice D8.

Bylo dosaženo následujících stupňů stability:

Řez	$\sum M_{sf}$
A	0,98
C	1,002

Dle EC 7, který klade na stabilitu svahu požadavek stupně bezpečnosti při výpočtu s efektivními parametry hornin $\sum M_{sf} = 1,25$, lze konstatovat, že podle modelů vytvořených v rámci této diplomové práce svah požadavkům na stabilitu nevyhoví.

10. Závěr

Na základě veřejně dostupných informací o geologické prozkoumanosti zájmové oblasti Českého středohoří z dostupné literatury a informací ČGS byla popsána její základní geologická stavba a geologický vývoj.

S těmito informacemi, informacemi o vrtné prozkoumanosti oblasti sesuvu na dálnici D8 a už vytvořenými modely katedrou geotechniky FAST VŠB-TUO byly zkoumány pokročilé možnosti modelování horninového prostředí v softwaru RockWorks. Nakonec byl zvolen popsáný postup, který co možná nejvíce odpovídal známým informacím o geologické stavbě dané zájmové oblasti a který co možná nejvíce koreluje s už vytvořenými modely. Byly vytvořeny stratigrafické a litologické 3D modely zájmové oblasti sloužící zejména pro celkový přehled o geologické situaci a také pro ověření, že modelování probíhalo správně. Poté bylo vytvořeno několik 2D litologických řezů v oblasti sesuvu dle zadaných souřadnic, které byly využity pro další modelování. Litologické řezy byly následně exportovány do softwaru AUTOCAD, kde byly upraveny tak, aby byly využitelné pro stabilitní analýzu.

Stabilitní analýzou vytvořených řezů s upravenými parametry hornin bylo dosaženo stupňů stability $\Sigma M_{sf} \approx 1$ což nevyhoví požadavkům EC 7 na stabilitu svahu. **Dosažené výsledky však odpovídají výsledkům stabilitních analýz provedených na katedře geotechniky FAST VŠB-TUO.**

Z výsledků geotechnického modelování lze konstatovat, že při takto podrobně prozkoumaném relativně složitém geologickém prostředí lze software RockWorks, který je jinak vhodný pro modelování větších oblastí a větších kubatur, kde rozdíly v řádu metrů nehrají až takovou roli, pro geologické a následně geotechnické modelování využít. To ovšem předpokládá vysokou míru poznání daného geologického prostředí – je vysoce pravděpodobné, že **při nižším množství dat** poskytnutých pro tuto diplomovou práci a v případě, že by neexistovaly už vytvořené modely dané oblasti jinými metodami, **by takto relativně přesný geologický model nebylo možné vytvořit**. Následný převod na geotechnický model pomocí grafického softwaru zase předpokládá určitou míru správného úsudku, jak má dané geologické prostředí vypadat. Metoda litologického modelování softwarem RockWorks přímé využití pro geotechnické modelování neumožňuje a výstupy z tohoto softwaru stále obsahovaly určité množství dílčích nepřesností, které bylo nutné před provedenou stabilitní analýzou eliminovat.

11. Zdroje

- *Dálnice D8*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/D%C3%A1lnice_D8
- *K sesuvu půdy na dálnici D8 nemuselo vůbec dojít* [online]. Brno: © Vydavatelství Referendum s.r.o. 2017, 2013 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://denikreferendum.cz/clanek/16071-k-sesuvu-pudy-na-dalnici-d8-nemuselo-vubec-dojit>
- *Za sesuvy půdy na dálnici D8 nemůže voda ani těžba, ale Ředitelství silnic a dálnic, tvrdí expert* [online]. Praha: Centrum.cz | Atlas.cz 1999 – 2017 © Economia, 2017 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/dle-svetoveho-experta-na-sesuvy-za-situaci-na-dalnici-d8-muz/r~8b66458a31ab11e7a8d6002590604f2e/>
- MORAVEC, Václav In: *Otázky Václava Moravce* [televizní pořad], ČT 2016, ČT24 27.11.2016 12:00 Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/porady/1126672097-otazky-vaclava-moravce/216411030501127/video/506885>
- *Základní mapa* [online]. Praha: Mapy.cz ©, 2017, 2017 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.0209183&y=50.5620651&z=14&l=0>
- *Letecká mapa '15* [online]. Praha: Mapy.cz ©, 2017, 2015 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.0209183&y=50.5620651&z=14&l=>
- *Geologická mapa 1:50000* [online]. Praha: © Česká geologická služba 2017, 2017 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_50/
- *Geovědní mapy 1:500 000* [online]. Praha: © Česká geologická služba 2017, 2017 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr500/>
- *Analýza výškopisu* [online]. Praha: Copyright © 2010 ČÚZK, 2017 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: <http://ags.cuzk.cz/dmr/>
- *Sopečná činnost a sopky v České republice* [online]. Praha: GeoWeb © 1999 - 2017 Pavel Bokr, 2004 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.gweb.cz/clanky/clanek-61/>
- *Sopečná činnost a sopky* [online]. Praha: GeoWeb © 1999 - 2017 Pavel Bokr, 2001 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.gweb.cz/clanky/clanek-60/>
- *Velká křídová záplava* [online]. Praha: GeoWeb © 1999 - 2017 Pavel Bokr, 2003 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.gweb.cz/clanky/clanek-1/>

- *Krystalinikum* [online]. Praha: © Česká geologická služba 2007, 2007 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?krystalinikum>
- *RockWorks Users Manual* [online]. Golden: 2004-2017 RockWare, Inc. ©, 2017, 2017 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <https://www.pdfdrive.net/rockworks-user-manual-pdf-rockware-e12000166.html>
- *PLAXIS 2D 2017 – Tutorial Manual* [online]. Delft: © Plaxis 2017, 2017 [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: <https://www.plaxis.com/support/manuals/plaxis-2d-manuals/>
- PAŠEK, Jaroslav a Milan MATULA. *Regionálna inžierska geológia ČSSR*. Praha: SNTL, 1986.
- DERMEK, Jaromír et. al.. *Hory a nížiny. Zeměpisný lexikon ČR*. 2. upravené vydání. Praha: Academia Praha, 1987. ISBN 80-86064-99-9.
- PAŠEK, Jaroslav a Milan MATULA et. al.. *Inženýrská geologie I*. Praha: SNTL, 1995.
- PAŠEK, Jaroslav a Milan MATULA et. al.. *Inženýrská geologie II*. Praha: SNTL, 1995.
- MENZL, Vojtěch. *Mechanika zemin a skalních hornin*. 2 přepracované a doplněné vydání. Praha: Academia Praha, 1966.
- PAŠEK, Jaroslav a Jiří JANEK. *Sesuvy podél trasy projektované dálnice u Prackovic*. Praha: Geol. průzk., 1973.
- FUSSAGÄNGER, Egon. *Svahové pohyby a poruchy a ich geomechanické posudzovanie*. Bratislava: JAGA GROUP, 2016. ISBN 970-80-8026-124-0.
- BARTON, Nicholas. *Review of a new shear strength for rock joints*. 1. Oslo: Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1973.
- FORTEY, Richard. *Life: A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth*. New York: Vintage books, 1998. ISBN 0375702617
- ŠNELEROVÁ, Zuzana. *Pikritické horniny Českého středohoří*. Praha, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Emil Jelínek.
- ČSN 73 1001. *Zakládání staveb. Základová půda pod plošnými základy*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1988.
- ČSN EN ISO 14689-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení - pojmenování a zařizování hornin*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 2004.
- ČSN EN 1997-1. Eurokód 7: *Navrhování geotechnických konstrukcí*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 2006.

12. Seznam příloh

1. Zakrytá geologická mapa zájmové oblasti (© Česká geologická služba 2017)
2. Odkrytá geologická mapa zájmové oblasti (© Česká geologická služba 2017)
3. Mapa zájmové oblasti s vyznačením sesuvných území (Pašek, Janek, 1973) a sesuvem na D8 dle ČGS
4. Výpis vrtů
5. Výkres řezu A upraveného pro geotechnické výpočty
6. Výkres řezu C upraveného pro geotechnické výpočty
7. Výkres detailu odřezu dálnice D8 v řezu A
8. Výkres detailu odřezu dálnice D8 v řezu C